



Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

3(49) ' 2018

Заснований
у 2007 році

Наукове періодичне видання,
в якому відображені результати
наукових досліджень з розробки та
удосконалення систем управління,
навігації та зв'язку у різних
проблемних галузях.

Засновник:
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка

Адреса редакційної колегії:
Україна, 36011, м. Полтава,
Першотравневий проспект, 24

Телефон: +38 (066) 706-18-30
(консультації, прийом статей).

E-mail:
kozelnkova@ukr.net

Інформаційний сайт:
<http://www.pntu.edu.ua>

Реферативна інформація
зберігається: у загальнодержавній
реферативній базі даних
„Україніка наукова” та публікується
у відповідних тематичних серіях
УРЖ „Джерело”.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Голова:

КОЗЕЛКОВ Сергій Вікторович (д-р техн. наук, проф., Україна)

Заступники голови:

ШЕФЕР Олександр Віталійович (канд. техн. наук, доц., Україна)

ШУЛЬГА Олександр Васильович (д-р техн. наук, доц., Україна)

Члени:

БЛАУНШТЕЙН Натан Олександрович (д-р техн. наук, проф., Ізраїль)

ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф (д-р техн. наук, проф., Польща)

ІЛЬІН Олег Юрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КОРОБКО Богдан Олегович (д-р техн. наук, доц., Україна)

КОШОВИЙ Микола Дмитрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

КУЧУК Георгій Анатолійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛАДАНЮК Анатолій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович (д-р техн. наук, проф., Німеччина)

МАШКОВ Віктор Альбертович (д-р техн. наук, проф. Чехія)

МАШКОВ Олег Альбертович (д-р техн. наук, проф., Україна)

МОРГУН Олександр Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ПОПОВ Валентин Іванович (д-р фіз.мат. наук, проф., Латвія)

СТАНКУНАС Йонас (д-р техн. наук, проф., Литва)

СТАСЄВ Юрій Володимирович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ФРОЛОВ Євгеній Андрійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ХОРОШКО Володимир Олексійович (д-р техн. наук, проф., Україна)

ЧОРНИЙ Олексій Петрович (д-р техн. наук, проф., Україна)

Відповідальний секретар:

КОЗЕЛКОВА Катерина Сергіївна (д-р техн. наук, проф., Україна)

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор

Журнал індексується міжнародними бібліометричними та наукометричними базами даних: *Index Copernicus (Польща), General Impact Factor (ЄС), Google Scholar (США), Academic Resource Index (ЄС), Scientific Indexed Service (США).*

Затверджений до друку вченою радою Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка (протокол № 18 від 03 липня 2018 року)

Занесений до "Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук" (технічні науки) строком на п'ять років (від дати включення наказом Міністерства освіти і науки України) від 24.10.2017 № 1413 (додаток 7, п. 31)

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ГР від 16.11.2012 р.

З М І С Т

НАВІГАЦІЯ

<i>Остроумов І.В.</i> Поєднання координатної інформації за ймовірнісним підходом	3
<i>Сотніков О.М., Танцюра О.Б.</i> Метод вторинної обробки комбінованих кореляційно-екстремальних систем навігації безпілотних літальних апаратів	9

ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

<i>Машиков О.А., Мамчур Ю.В.</i> Обґрунтування напрямків розробки тренажерів підготовки операторів дистанційно-пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу	16
<i>Сметанін К.В.</i> Особливості використання безпілотних літальних апаратів в екологічному моніторингу	22
<i>Хижняк І.А., Маковейчук О.М., Худов Г.В.</i> Інформаційна ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження	26
<i>Яровий О.В.</i> Системи управління безпілотними літальними апаратами для здійснення моніторингу наземних об'єктів	33

РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОТЕХНІКА

<i>Волосюк В.К., Жила С.С.</i> Феноменологічний опис когерентного зображення поверхні в оптико-електронних та радіотехнічних системах дистанційного зондування	39
<i>Казаков Е.Л., Казаков А.Е., Решетник В.М.</i> Возможности получения поляризационных матриц рассеяния целей при управлении поляризацей поля антен РЛС	46
<i>Коржов А.М., Артеменко А.М., Костянець О.В., Струцінський О.В.</i> Особливості багаточастотних сигналів та їх використання в РЛС виявлення маловисотних цілей над морем.....	50
<i>Федоров А.В., Чалий В.В., Фінаєв В.П.</i> Використання системи мультилатерації для підвищення якості радіолокаційного контролю повітряного простору	55

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ

<i>Гадецкая С.В., Дубницький В.Ю., Кобылин А.М.</i> Параметрическая эластичность энтропии Шеннона, Тсаллиса и Реньи	61
<i>Гребенник И.В., Черная О.С., Макарова Е.Е.</i> Оптимизация линейных функций на множестве циклических перестановок с линейными ограничениями	67
<i>Лецинский В.А., Лецинская И.А.</i> Усовершенствование метода колаборативной фильтрации с неясной обратной связью на основе ранжирования отрицательных результатов в матрице исходных данных	73
<i>Приставка Ю.В.</i> Точні розв'язки нелінійного (1+2)-вимірного рівняння реакції-конвекції-дифузії	78
<i>Рахими Я., Шостак И.В., Феоктистова Е.И.</i> Нечеткое моделирование транспортной составляющей полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину	83

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Алєшин С.П., Бородина Е.А.</i> Нейросетевая оптимизация фискально-налоговой нагрузки как элемент цифровизации экономики региона	88
<i>Berdnikov A., Shakhova E.</i> Model of industrial process in implementation of IT project	93
<i>Войтко О.В.</i> Оцінювання ефективності функціонування системи стратегічних комунікацій Міністерства оборони та Збройних Сил України	97
<i>Golovko G.V., Koltunov M.G., Samofal A.S.</i> Problems of comprehensive protection of information at PJSC "Research and design-processing institute of the enameled chemical equipment and new technologies Kolan"	100
<i>Golovko G.V., Nikiforova K.M.</i> Information systems use at Poltava national technical Yuri Kondratyuk University	103
<i>Гришманов Д.С.</i> Метод вибору раціональних алгоритмів дій авіаційного диспетчера	106
<i>Ichanska N., Podoshvelev Yu., Smitskiy O., Rybachenko K.</i> A quality selection of software to build a service of electronic equipment sales	111
<i>Коваленко О.В.</i> Методи якісного аналізу та кількісної оцінки ризиків розробки програмного забезпечення	116
<i>Мирошніченко І.В., Мирошніченко М.В.</i> Расчет неопределенности измерений при рентгенофлуоресцентном и оптико-эмиссионном анализе с помощью программного обеспечения OXSAS корпорации Thermo Fisher Scientific .	126
<i>Певнев В.Я., Лейченко К.Н.</i> Анализ вектора атаки технологии беспроводной передачи данных Bluetooth	131
<i>Свиридов А.С.</i> Метод підвищення надійності передачі даних під час використання протоколу TCP Freeze шляхом підвищення пропускної спроможності	135
<i>Семенов С.Г., Липчанська О.В., Липчанський М.В.</i> Аналіз методів управління передачею відеопотоку даних та вимог до якості їх передавання	139
<i>Smoliar V.H., Sliusar I.I., Chernytska I.O., Krysh V.V., Orlysenko O.V.</i> Increasing the productivity of the bridge crane due to the introduction of arduino's hardware and software base in its control system	143
<i>Шилов Ф.І., Скулиш М.А., Сафарян А.</i> Дослідження ефективності методу оптимального вибору обчислювальних ресурсів для білінгвових систем	147
<i>Донець В.В., Кучук Н.Г., Шматков С.І.</i> Моделювання інформаційної системи e-learning з використанням генетичних алгоритмів	153
<i>Зіменко Л.М.</i> Метод забезпечення функціональної живучості інтелектуальної надбудови з централізованим принципом управління наданням інтелектуальних сервісів	157

ЗВ'ЯЗОК

<i>Обіход Я.С., Лисечко В.П., Прогонний О.М., Качуровський Г.М., Сколота С.В.</i> Розробка методу вибору каналів когнітивного радіо при множинному доступі первинних та вторинних користувачів з використанням технології «Energy harvesting» під керуванням нейронної мережі	165
<i>Сokol Г.В., Москаленко А.О., Рвачова Н.В., Буряк Т.В., Глуховець Ю.В., Варич В.В.</i> Перешкодостійкість сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації	175
<i>Стасев С.Ю., Серов С.С., Сапрунов В.В.</i> Метод побудови різницевої множин для синтезу дискретних сигналів із заданими властивостями	180

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК	184
----------------------------------	-----

І. В. Остроумов

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ПОЄДНАННЯ КООРДИНАТНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ЗА ЙМОВІРНІСНИМ ПІДХОДОМ

Розглянуто основні датчики координатної інформації літака цивільної авіації, що застосовуються для вирішення задачі позиціонування у просторі, а саме супутникову та інерціальну системи; алгоритми зональної навігації у обчислювальній системі літаководіння, що функціонують за сигналами наземних далекомірних (DME) та кутомірних (VOR) радіомаяків. Проаналізовано математичні підходи до об'єднання даних на різних рівнях обробки, зокрема розглянуто поєднання координатної інформації за методом максимальної достовірності. Вперше представлено структурну схему поєднання координат літака, отриманих за результатами попарного та множинного принципів позиціонування на основі даних наземних радіомаяків. Досліджено використання ймовірнісного підходу для поєднання координатної інформації літака у випадку, коли розподіли похибок вимірювання мають Гаусівський вигляд.

Ключові слова: координати, місцеположення, об'єднання інформації, Байєс, ймовірність, точність, повітряний корабель.

Вступ

Визначення точного місцеположення повітряного корабля (ПК) є однією з найважливіших задач цивільної авіації. Зростаючі обсяги авіаперевезень вимагають постійного перегляду норм ешелонування для задоволення росту потреб авіаційного транспорту. Норми ешелонування ПК визначають максимально допустимі межі розділення ПК у просторі у вертикальній площині, боковому та повздовжньому відхиленнях. Єдиним можливим шляхом вирішення питання перевантаженості повітряного простору є збільшення пропускної здатності певної частини повітряного простору за рахунок зменшення безпечних відстаней між ПК. На практиці це реалізується шляхом введення більш точних вимог до визначення місцеположення ПК у просторі (RNP – Required Navigation Performance) [1]. Введення більш точних вимог до позиціонування ПК можливе лише за умови наявності відповідних систем здатних задовільнити їх. Функціонування систем позиціонування ПК цивільної авіації забезпечується полем аеронавігаційних сигналів, що створюється у просторі різними системами.

Сучасний літак цивільної авіації обладнаний цілою групою різноманітних датчиків, що забезпечують визначення координат місцеположення ПК у просторі. До основних систем відносяться: глобальна супутникова система позиціонування (GNSS – Global Navigation Satellite system) [2], інерціальна система (ІНС), алгоритми зональної навігації за наземними радіомаяками (далекомірними (DME – Distance Measure Equipment), всенаправлений кутовий (VOR – VHF Omni Range), ненаправлений (NDB – Non Directional Beacon) [3]. Кожна з систем визначається певними точнісними характеристиками та доступністю їх послуг у просторі. Відповідно, з точки зору проблеми позиціонування, ПК можна розглядати як мульти-датчикову систему. Оскільки кожний датчик застосовує різний метод визначення координат, то отриманим результатам позиціону-

вання будуть властиві різні ймовірнісні розподіли похибок. Питання поєднання координатної інформації є актуальними та важливими при прийнятті рішення про місцеположення ПК з метою здійснення навігації у просторі відповідно до вимог безпеки повітряного руху.

Питання поєднання інформації датчиків розглядались у працях багатьох вчених, зокрема Federico Castanedo [4] виконав розгорнутий аналіз існуючих методів поєднання координатної інформації; Martin E. Liggins, David L. Hall, James Llinas [5] та Guo D., Zhong M. [6] дослідили об'єднання інформації у мульти-датчикових системах; Jiang L., Yan L., Xia Y., Guo Q., Fu M. [7, 8] розглядали питання поєднання вимірювань датчиків під дією корельованих завад; Shimin Feng [9] та Panicker M. [10] досліджували питання поєднання координатної інформації при позиціонуванні роботів у просторі. Проте, питання поєднання координатної інформації на борту ПК не досліджені повністю в умовах сучасного різноманіття систем позиціонування та зростаючої ролі засобів зональної навігації.

Основною метою статті є дослідження можливостей об'єднання координатної інформації стосовно місцеположення ПК у просторі з метою забезпечення вимог неперервності навігаційної інформації, у випадку погіршення точнісних характеристик певних систем чи їх повної недоступності. Для досягнення поставленої мети пропонується проаналізувати датчики координатної інформації, алгоритми поєднання даних позиціонування та застосувати ймовірнісний підхід для поєднання даних про місцеположення ПК.

Аналіз джерел координатної інформації

Численні переваги GNSS зробили її основним джерелом координатної інформації, що визначають місцеположення ПК у просторі. Висока точність визначення координат, у порівнянні з іншими системами, доступність у глобальному масштабі та безо-

платний доступ до основних послуг GNSS затвердили обов'язковість її використання для цілей навігації ПК у численних міжнародних документах [2]. На сьогоднішній день GNSS представлені наступним супутниковими системами: GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BeiDou, що функціонують разом з їх функціональними доповненнями GBAS (Ground Based Augmentation System) та SBAS (Satellite Based Augmentation System) (EGNOS, WAAS, MSAS) [11]. Проте, сьогодні послуги GNSS стикаються з проблемами електромагнітної сумісності з іншим електронним обладнанням та незумисного «глушіння» сигналів [12].

У такому випадку алгоритми обчислювальної системи літаководіння задіють інші джерела координатної інформації наприклад ІНС. ІНС ґрунтуються на використанні властивостей тіла залишатися в стані спокою чи рівномірного прямолінійного руху при відсутності зовнішніх впливів та протидіяти зміні своєї швидкості при прикладенні дії зовнішніх сил [11]. ІНС використовують два типи датчиків гіроскопи та акселерометри, що вимірюють швидкості за силами інерції, прикладених до певної інерційної маси всередині датчика. Гіроскопічні датчики оцінюють кути орієнтації ПК у просторі шляхом вимірювання кутових швидкостей. Акселерометри вимірюють складові прискорення чи швидкості за осями координат. За відомими координатами попереднього місцеположення ПК у просторі, зміною кутової орієнтації та складовими швидкості безплатформні ІНС оцінюють теперішнє місцеположення ПК. Необхідність використання попередньої позиції та інформації від датчиків зумовлюють поступове накопичення похибки, що обмежує час використання ІНС. Відомі різні схеми інтеграції приймачів GNSS та ІНС з метою підвищення доступності та неперервності інформації.

Іншими джерелами координатної інформації на борту ПК є застосування методів зональної навігації у обчислювальній системі літаководіння (FMS – Flight Management System). Методи зональної навігації застосовують навігаційні сигнали наземних радіомаяків для позиціонування у горизонтальній площині. Визначення координат за наземними радіомаяками ґрунтується на одночасному використанні двох комплектів бортового обладнання (DME, VOR чи автоматичного радіо компаса (АРК)) для визначення похилої дальності та кутової інформації двох радіомаяків з подальшим використанням далекомірного, кутомірного чи кутомірно-далекомірного методу позиціонування [13-15]. Крім того, відомі методи позиціонування за групою радіонавігаційних засобів, що використовують певні математичні методи прогнозування інформації датчиків для розширення вхідної інформації з метою підвищення точності за рахунок покращення геометрії місцерозташування [16]. Точність позиціонування за парними радіомаяками DME/DME, VOR/DME, VOR/VOR, АРК/АРК залежить від багатьох факторів зокрема від геометрії розташування у просторі та відстаней, проте, у загальному випадку є на порядок нижчою ніж GNSS.

Модель поєднання координатної інформації

Забезпечення оптимальних характеристик точності та доступності позиціонування ПК для цілей навігації досягається за рахунок поєднання даних. Поєднання даних дозволяє комбінувати вимірювання від різних датчиків з метою підвищення точності та досягнення специфічних характеристик суміші, що не можуть бути отримані від одного датчика.

Вимірювання одного параметра типовими датчиками забезпечить результат з певною варіаційною компонентою. У випадку застосування типових датчиків для вимірювання одного параметра отримані значення будуть різнитися внаслідок дії похибок вимірювання, що зазвичай мають Гаусоподібний розподіл ймовірностей. Поєднання даних у такому випадку можливе шляхом пошуку середнього значення.

Поєднання координатної інформації є більш складним процесом, оскільки однакові параметри вимірюються за допомогою принципово різних датчиків з різними розподілами похибок.

У загальному випадку, поєднання інформації у цифрових системах можливе на різних етапах обробки даних:

- низький рівень поєднання інформації оперує безпосередньо з результатами вимірювань певних датчиків (наприклад дальності у DME чи кутовою інформацією у VOR) з метою отримання більш точних результатів;

- середній рівень поєднання інформації відбувається на рівні характеристик чи певних особливостей вимірюваного параметру з метою отримання інших похідних характеристик, що необхідні для вирішення певних завдань;

- високий рівень поєднання інформації забезпечує прийняття рішення на основі чисельного представлення джерел інформації та поєднання їх з метою отримання більш точного рішення.

Задача поєднання координатної інформації вирішується програмно у внутрішній пам'яті FMS. Запропонована модель поєднання координатної інформації наведена на рис. 1. У якості вхідних даних використовується координатна інформація від GNSS та ІНС, дані вимірювань DME, VOR та АРК.

Результати вимірювань датчиків використовуються відповідними методами позиціонування. Для позиціонування за сукупністю навігаційних сигналів датчики розглядаються як окремі системи, що містять внутрішню базу даних для накопичення результатів попередніх вимірювань та засоби для прогнозування [16]. Об'єднання навігаційних даних відбувається на різних рівнях. Зокрема, позиціонування за даними суміші від кутомірної та далекомірної систем VOR/DME може розглядатися як метод поєднання навігаційних даних на нижньому рівні. Кожний датчик розглядаються з властивою йому сукупністю похибок вимірювання. Кожному методу визначення координат місцеположення ПК притаманні певні похибки, оцінювання значень яких відбувається одночасно з позиціонуванням.

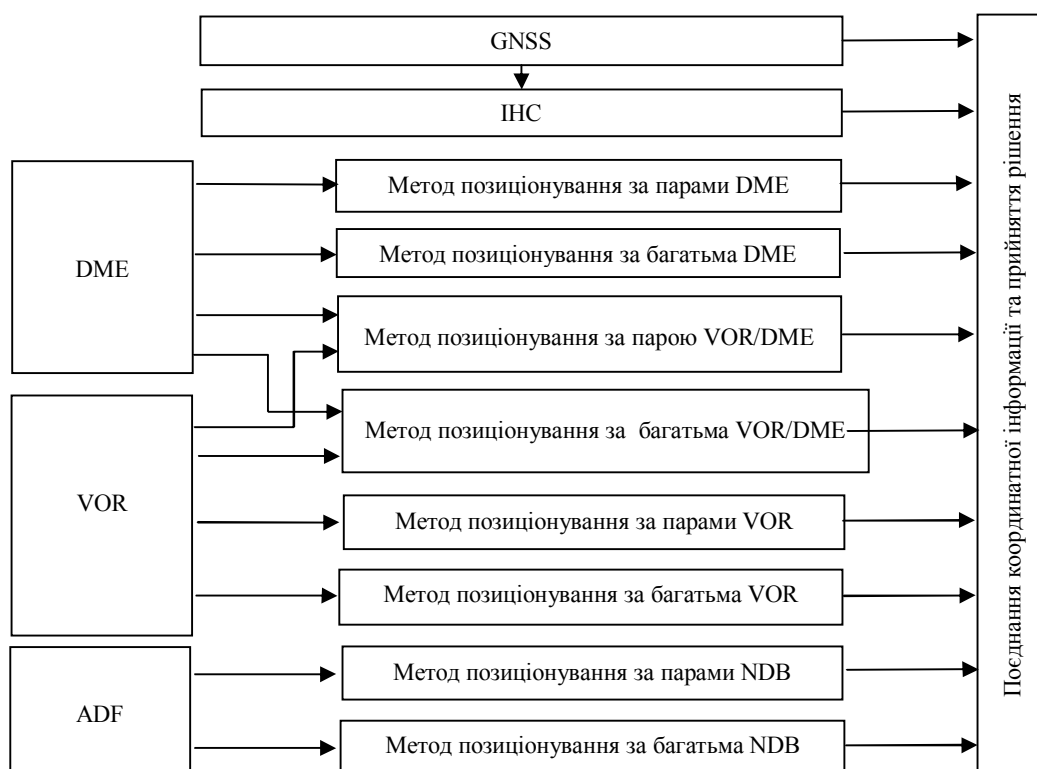


Рис. 1. Модель поєднання координатної інформації

Отримані позиції ПК разом з величинами, що характеризують похибки використовуються при об'єднанні координатної інформації на високому рівні поєднання даних.

Поєднання інформації та прийняття рішення на високому рівні зазвичай забезпечуються ймовірнісними методами, оскільки дані на цьому рівні характеризуються різними ймовірнісними законами розподілу випадкових величин. Ймовірнісні методи найкращим чином враховують невизначеність кожного з методів позиціонування за допомогою математичного апарату теорії ймовірності. В динамічних системах стан системи визначається виходячи з результатів вимірювань певних параметрів, що характеризують її стан. Результат визначення стану завжди пов'язаний з певною невизначеністю, оскільки вимірним параметрам властива дія похибок, що здебільшого має різні характеристики розподілу випадкової величини та різну частоту вимірювань.

Об'єднання координатної інформації за ймовірнісним підходом ґрунтується на формулі Байєса, що вказує на те, що апостеріорна щільність розподілу випадкової величини x ($\rho(x/Z)$) пропорційна добутку апіорної щільності ймовірності ($\rho(x)$) та відповідних функцій правдоподібності x за відомими вимірюваннями z ($\rho(z_i/x)$) [5]:

$$\rho(x/Z) \approx \rho(x) \prod \rho(z_i/x).$$

У випадку, коли функції правдоподібності мають Гаусівський розподіл, а апіорну щільність ймовірності можна вважати рівній одиниці, тоді:

$$\rho(x/Z) = \prod_z \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-0.5 \left(\frac{x-z_i}{\sigma_i}\right)^2\right). \quad (1)$$

Оцінка x може бути отримана за критерієм максимальної правдоподібності шляхом знаходження похідної від (1) та прирівнювання її значення до нуля:

$$\sum_z (\hat{x} - z_i) / \sigma_i^2 = 0,$$

$$\text{чи} \quad \hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^N \omega_i z_i}{\sum_{i=1}^N \omega_i}, \quad (2)$$

де $\omega = \sigma_i^2$ – ваговий коефіцієнт.

Дисперсія оцінки може бути записана наступним чином:

$$\sigma_c^2 = 1 / \sum_{i=1}^N \omega_i. \quad (3)$$

Досліджуючи характеристики об'єднання інформації за (2) для випадку двох датчиків ($\sigma_1=10$, $x_1=0$) з рис. 2 видно, що значення σ_c оцінені за (3) прокрашують окремі значення σ_1 та σ_2 у зоні значень до $\sigma_2=3\sigma_1$. Для більших значень σ_2 функція (3) зростає поступово наближуючись до значення σ_1 . Поєднання інформації за (2) максимізує функції правдоподібності кожного з датчиків та забезпечує зменшення результуючої дисперсії у порівнянні з кожним датчиком окремо.

На рис. 3 наведено приклад поєднання параметра вимірюного трьома датчиками, що характеризуються Гаусівськими щільностями з різними параметрами z та σ . Геометрично об'єднання координатних даних за (2) можна представити у вигляді еліпсів як показано на рис. 4.

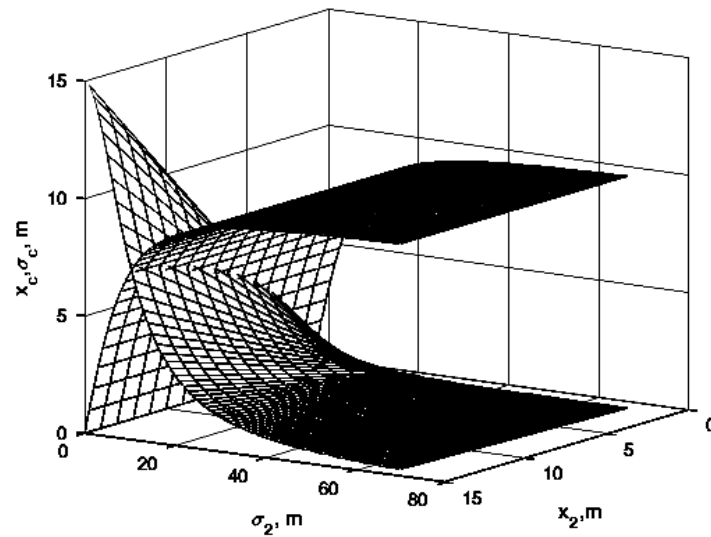
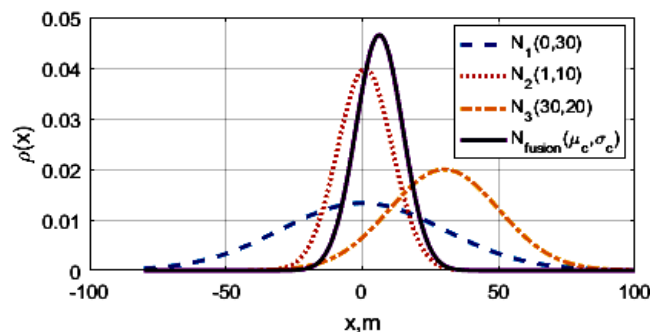
Рис. 2. Значення σ_c , x_c при поєднанні інформації від двох датчиків

Рис. 3. Об'єднання інформації від трьох датчиків

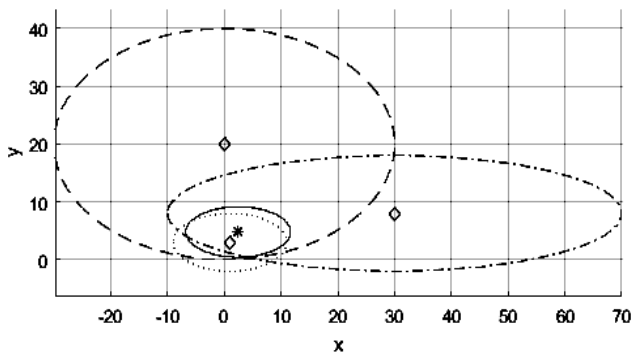


Рис. 4. Об'єднання координатної інформації за методом максимальної достовірності

Результат об'єднання є зваженим середнім значенням, а зважена похибка буде обмежувати зону перетину кожного з еліпсів похибок.

Результати комп'ютерного моделювання

Верифікацію запропонованої моделі поєднання координатної інформації виконано за допомогою методу комп'ютерного моделювання з використанням траєкторної інформації. Дані траєкторії руху ПК зафіксовані за допомогою приймача сигналів ADS-B [11] у форматі 1090ES декодуються та зберігаються у базі даних за кожним ПК окремо. У якості прикладу, був обраний довільний маршрут польоту

«AUI58» з сполученням Бориспіль (UKBB) – Одеса (UKOO). Зафіксовані дані місцеположення ПК у форматі широта, довгота, висота містили несинхронізовані по часу вимірювання, що є результатом роботи бортового обладнання та похибок у розпізнаванні. Для зведення до єдиної системи часу виконано інтерполяцію на певний час. Таким чином була отримана траєкторія руху ПК через певні проміжки часу ($t_s=1c$). Отримані дані траєкторії руху були використані у якості істинної траєкторії для моделювання вимірювань DME та VOR, на основі яких були задіяні алгоритми позиціонування за параметрами радіонавігаційних засобів. У процесі позиціонування задіявались алгоритми пошуку доступних радіонавігаційних засобів, вибору оптимальної пари, моделювання вимірювань параметрів від оптимальних засобів, дальномірний та кутомірний метод позиціонування. На рис. 5 наведено структурну схему процесу моделювання вимірювань.

Результати об'єднання координатної інформації для перших 303 с польотного часу наведено на рис. 6.

Розмах даних GNSS визначається похибкою позиціонування у горизонтальній площині, що протягом досліджуваного часу знаходилась у межах 25 м. Похибки позиціонування за парою DME/DME, VOR/VOR, VOR/DME значно варіюються під час польоту, оскільки залежать від геометрії розташування наземних станцій та відстані до них (рис. 7).

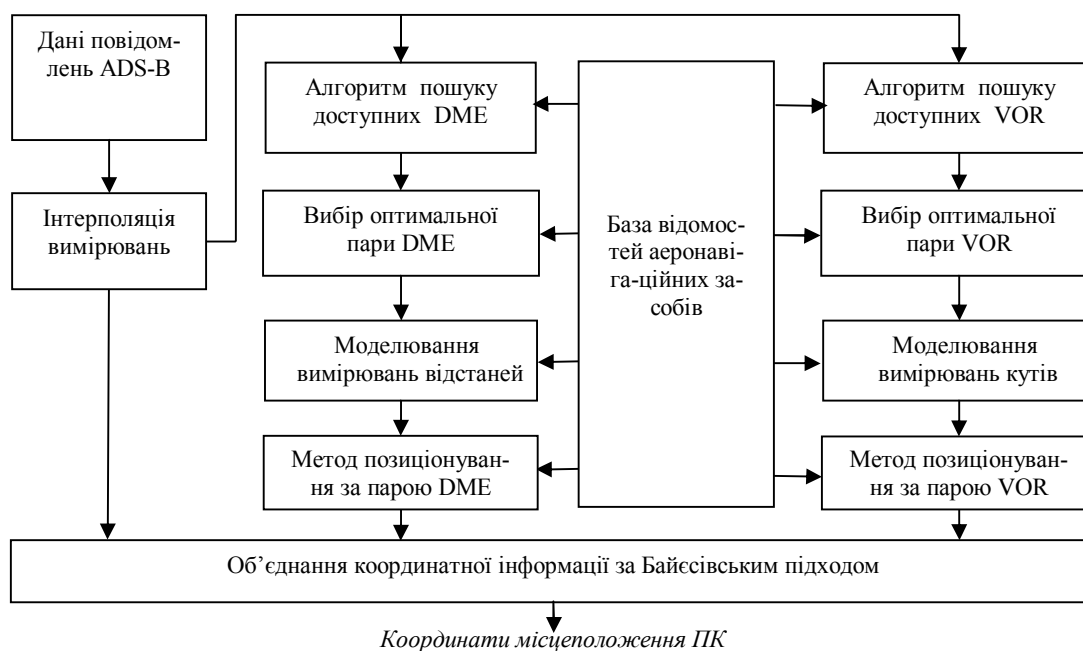


Рис. 5. Структурна схема моделювання отримання та об'єднання координатної інформації

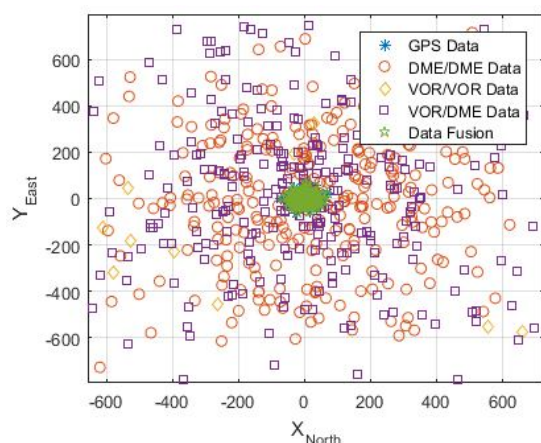


Рис. 6. Об'єднання координатної інформації

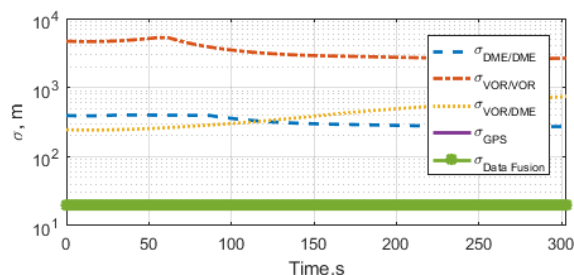


Рис. 7. Середньоквадратичні відхилення

Похибки позиціонування за VOR/VOR значно перевищують значення для далекомірного методу позиціонування за DME, що пов'язано з малою кількістю доступних VOR для навігації у повітряному просторі України.

З рис. 6 бачимо, що результат поєднання інформації наближається до значень найточнішого датчика, та практично співпадатиме з значеннями GPS для наведеного проміжку польоту. Цікавим є період зміни точності позиціонування, наприклад значного погіршення точності за GPS. У такому випадку, результат об'єднання буде змінюватись і наближатись до точнішого значення.

Висновки

Запропонована модель поєднання координатної інформації, отриманої від різних датчиків з Гаусоподібним розподілом ймовірностей похибок дозволяє отримати оптимальну з точки зору функції правдоподібності оцінку місцеположення ПК. Результати дослідження польотних даних вказують на значну різницю в точності різних методів позиціонування. Дані GNSS є найбільш точними, проте, у випадку погіршення точності методи зональної навігації мають застосовуватися для визначення місцеположення ПК, зокрема позиціонування за парами DME/DME, VOR/VOR чи VOR/DME. Точність зональної навігації залежить від геометрії розташування та відстані до навігаційного засобу. У випадку вагового поєднання координатної інформації (3) від різних датчиків дані поєднуються відповідно їх точності, що наближає результат до більш точних даних. У випадку поєднання координатної інформації ПК, результат об'єднання даних буде майже збігатися з найбільш точними даними GNSS, оскільки, всі іншим методам властива на порядок нижча точність позиціонування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Performance-based Navigation (PBN) Manual. Doc 9613. – ICAO, 2008. – 304 p.
2. Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual. Doc 9849. – ICAO, 2012. – 68 p.
3. Ostroumov I. Accuracy estimation of alternative positioning in navigation / I. Ostroumov, N. Kuzmenko // 2016 IEEE 4th International Conference «Methods and Systems of Navigation and Motion Control» (MSNMC), October 18-20, – 2016 : proceedings. – Kyiv, 2016. – P. 291-294.

4. Castanedo F. A review of data fusion techniques / F. Castanedo // The Scientific World Journal. – 2013. – 19 p.
5. Handbook of multisensor data fusion: theory and practice / M. E. Liggins, D. L. Hall, J. Llinas. – CRC press, 2017. – 872 p. ISBN 978-1-4200-5308-1
6. Guo D. Multisensor Data-Fusion-Based Approach to Airspeed Measurement Fault Detection for Unmanned Aerial Vehicles / D. Guo, M. Zhong, D. Zhou // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2018. – № 67(2). – P. 317-327.
7. Jiang L. Asynchronous Multirate Multisensor Data Fusion over Unreliable Measurements with Correlated Noise / L. Jiang, L. Yan, Y. Xia, Q. Guo, M. Fu, K. Lu // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2017. – P. 2427 – 2437.
8. Jiang L. Event-triggered multisensor data fusion with correlated noise / L. Jiang, L. Yan, Y. Xia, Q. Guo, M. Fu, B. Xiao // In Information Fusion (Fusion), 2017 20th International Conference on IEEE. – 2017. – P. 1-8.
9. Shimin F. Fusing Kinect sensor and inertial sensors with multi-rate Kalman filter / F. Shimin, R. Murray-Smith. – 2014. – 192 p.
10. Panicker M. Multisensor data fusion for an autonomous ground vehicle / M. Panicker, T. Mitha, K. Oak, A.M. Deshpande, C. Ganguly // Advances in Signal Processing (CASP), Conference on IEEE. – 2017. – P. 507-512.
11. Авіоніка: навч. посіб. / В.П. Харченко, І.В. Остроумов – К.: НАУ, 2012 – 281 с.
12. Lubbers B. A study on the accuracy of GPS positioning during jamming / B. Lubbers, S. Mildner, P. Onincx, A. Scheele // Navigation World Congress (AIN), – 2015, International Association of Institutes, IEEE. – P. 1–6.
13. Остроумов І.В. Оцінювання точності визначення лінії положення за парою далекомірною обладнання DME при вирішенні навігаційних задач / І.В. Остроумов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2017. – № 2 (42). – С. 8-12.
14. Остроумов І.В. Оцінювання точності DME/DME позиціонування для повітряного простору України / Остроумов І.В. // Проблеми інформатизації та управління: Збірник наукових праць: Випуск 3(43). – К.:НАУ, 2013.– С. 61-67.
15. Ostroumov I.V. Analysis of DME/DME positioning facility for Ukrainian airspace // The Seventh World Congress “Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies”. Volume 2. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 3.6.1-3.6.4
16. Ostroumov I.V. Timing problem of multi DME/DME approach // The Seventh World Congress “Aviation in the XXI-st century – Safety in Aviation and Space Technologies”. Volume 2. – Kyiv: NAU, 2016. – P. 3.6.5-3.6.7.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Козелков,
Державний університет телекомунікацій, Київ
Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

Объединение координатной информации по вероятностному подходу

И. В. Остроумов

Рассмотрены основные датчики координатной информации самолёта гражданской авиации, которые используются для решения задачи позиционирования в пространстве, а именно спутниковую и инерциальную системы; алгоритмы зональной навигации в вычислительной системе самолётовождения по данным наземных радиомаяков. Проанализированы математические подходы к объединению данных на разных этапах обработки информации, кроме того рассмотрено объединение информации по методу максимальной правдоподобности. Впервые представлено структурную схему объединения координат самолёта, полученных по результатам парного и множественного принципов позиционирования на основании данных наземных радиомаяков. Исследовано использование вероятностного подхода при объединении координатной информации самолёта для случая когда распределения ошибок имеют Гауссообразный вид.

Ключевые слова: координаты, местоположение, объединение информации, Байес, вероятность, точность, летательный аппарат

Coordinates data fusion with probabilistic approach

I. Ostroumov

The paper is devoted to the task of positioning that plays an important role in navigating an aircraft in airspace, the accuracy of which depends on the safety of aviation. The paper considers the most common avionics of civil aircraft that includes equipment of Global Navigation Satellite System (GNSS), Inertial Navigation System, and area navigation positioning algorithms within Flight Management System (FMS) functionality for positioning using signals from navigational aids. Each of considered equipment meets the required level of accuracy, continuity, and integrity of coordinate data, which depend on a variety of factors. In terms of global availability and the best accuracy, GNSS is considered as a primary source of data, however positioning by navigational aids data can be used in case of GNSS lock or pure accuracy positioning. In addition, the paper regards different algorithms of coordinate's detection in FMS: positioning by Distance Measurement Equipment (DME) realizing time of arrival method, positioning by VHF Omni-directional radio Range (VOR) or Automatic Directional Finder (ADF) data that uses angle of arrival methods. Data fusion process is considered at different levels. VOR/DME data processing is represented at the paper as a particular case of low-level data fusion. A block-diagram of sensor coordinate data fusion that includes lower level of sensor data fusion and multi sensor coordinates fusion from pair based and multi sensors approaches is proposed. Proposed approach of data fusion is grounded on weight coefficients that indicate accuracy of each positioning algorithm at high level of integration. At high level of data fusion, a probabilistic approach for a case when the distribution of measurement errors have Gaussian form is proposed. Verification of probabilistic data fusion approach has been performed with iterative computer based simulation. Trajectory of AUI58 flight was recorded by ADS-B equipment and used in simulation part. Stochastic simulation of DME and VOR measured data was used in pair-based (DME/DME, VOR/DME, VOR/VOR) and multi navigational aids algorithms of coordinates detection. Results of simulation indicate the possibility of data fusion weighted algorithm application for civil aviation.

Keywords: coordinates, position, data fusion, Bayesian, probability, accuracy, aircraft.

О. М. Сотніков, О. Б. Танцюра

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД ВТОРИННОЇ ОБРОБКИ КОМБІНОВАНИХ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

Розроблено метод формування еталонного зображення району прив'язки безпілотних літальних апаратів, який забезпечує можливість формування вирішальної функції як для радіометричного, так і оптико-електронного каналів формування поточних зображень. Формування еталонних зображень запропоновано здійснювати шляхом побудови селективних зображень сукупності найбільш яскравих стаціонарних об'єктів поверхні візування, які створюють допоміжні геометричні інваріанти та забезпечують підвищення точності місцевизначення безпілотного літального апарату шляхом їх адаптації як до перспективних, так і до масштабних спотворень зображень об'єктів поверхні візування. Розроблено метод формування унімодальної вирішальної функції комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації, який враховує тримірну форму об'єктів поверхні візування, зміну просторового положення і орієнтації безпілотного літального апарату та похибки, обумовлені визначенням місцеположення безплатформених інерційних навігаційних систем.

Ключові слова: кореляційно-екстремальна система навігації, безпілотний літальний апарат, еталонне зображення, геометричні інваріанти, поточне зображення, селективне зображення, вирішальна функція.

Вступ

Тенденція застосування кореляційно-екстремальних систем навігації (КЕСН) для корекції роботи інерційних навігаційних систем чітко відслідковується на сучасному етапі розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що обумовлено необхідністю забезпечення суперечливих вимог до високої точності навігації (наведення) при одночасній завадозахищеності і прихованості роботи БПЛА [1]. Найчастіше на легких типах БПЛА застосовуються комбіновані КЕСН з датчиками різної фізичної природи у зв'язці з безплатформеними інерційними навігаційними системами (БІНС). Але для прихованого отримання інформації про поверхню візування (ПВ) доцільно використовувати в комбінованих КЕСН телевізійні та радіометричні канали [2, 3].

Еталонні зображення (ЕЗ) для КЕСН формується непрямым шляхом на основі ідентифікації аерофотознімків (АФЗ) району прив'язки з подальшим уточненням результату на основі наповнення об'єктового складу. Ідентифікація АФЗ полягає в побудові в деякій системі координат, пов'язаної з АФС, відображення, що ставить у відповідність кожній точці тип підстилаючої поверхні відповідно до ідентифікації АФЗ. Може виявитися, що різні типи поверхонь мають приблизно однакові випромінювальні здатності, тоді їх необхідно віднести до одного типу. Зазвичай вважається, що в радіометрії впевнено розрізняються 4...5 типів підстильних поверхонь [4].

ЕЗ – це $N_1 \times N_2$ матриця чисел і формується для кожної точки прив'язки розрахункової траєкторії, яка визначається польотним завданням.

Надалі під ЕЗ будемо розуміти зображення, що формується для порівняння з поточним зображенням (ПЗ), отриманим на якомусь одному сеансі прив'язки.

Для синтезу ЕЗ необхідно розрахувати координати точок перетину осей парціальних діаграм

спрямованості антенної системи з поверхнею Землі і визначити тип підстилаючої поверхні для кожної такої точки відповідно до ідентифікації АФЗ.

У відповідності до формалізованої моделі опису процесу функціонування комбінованої КЕСН [5] формування вирішальної функції (ВФ) потребує застосування ЕЗ, в яких, як і у сформованих радіометричних і оптичних (ПЗ), повинні бути враховані наступні фактори:

- 1) особливості функціонування КЕСН, що обумовлюють формування ПЗ тим, чи іншим каналом в залежності від висоти та умов оперативного-тактичної обстановки (ОТО);
- 2) форма об'єктів візування;
- 3) різниця в роздільній здатності окремих каналів КЕСН;
- 4) різниця в інформаційному наповненні елементів зображень;
- 5) просторове положення та орієнтація БПЛА.

Відомо [6, 7], що формування ЕЗ для застосування в комбінованих КЕСН можливе за допомогою методів комплексування. Однак існуючі методи комплексування різноспектральних зображень не можуть застосовуватись безпосередньо для формування сукупності ЕЗ, оскільки лише поєднують ряд інформативних ознак різноспектральних зображень і не враховують особливості функціонування та умов застосування різних каналів КЕСН, що може призводити до появи в межах об'єкта нових контурів за рахунок тримірної форми, їх розмиття, або зникнення.

В результаті може виникати невідповідність сформованого заздалегідь ЕЗ поточному зображенню. Це обумовлює необхідність подальшої розробки методів та алгоритмів формування ЕЗ, які будуть забезпечувати відповідність сформованим ПЗ різних каналів КЕСН.

Такий підхід забезпечить формування унімодальної ВФ КЕСН та відповідну точність місцевизначення БПЛА.

Метою статті є розробка методу формування ЕЗ комбінованих КЕСН з використанням геометрично пов'язаних об'єктів в якості інваріантної інформативної ознаки та методу формування унімодалльної ВФ, який враховує тримірну форму поверхні об'єктів візування і зміну просторового положення і орієнтації БпЛА.

Виклад основного матеріалу

При обґрунтуванні вибору типу інформативного поля (ІП) будемо вважати, що ПВ описується моделями, наведеними в роботах [8]. Вплив спотворюючих факторів на ПВ відсутній. У відповідності до принципу дії КЕСН в якості параметра, що характеризує ІП будемо використовувати максимальне значення коефіцієнта взаємної кореляції (КВК) – $K_{\max}(i, j)$, як результат порівняння ВЗ ПВ $S_{ПВ}$ з сформованим селективним зображенням, що утворює ЕЗ.

Розмір ВЗ ПВ $M_1 \times M_2$, розмір фрагмента (ковзного вікна $S_{KB} \in S_{ПВ}$) $N_1 \times N_2$ з координатами верхнього кута (i, j) . КВК ВЗ та фрагменту ЕЗ для усіх $i = 1 \dots M_1 - N_1$ та $j = 1 \dots M_2 - N_2$ утворює поле кореляційного аналізу. Сформоване поле кореляційного аналізу характеризує ступінь схожості ІП ділянок зображення ПВ з ІП інших ділянок зображення.

Відповідно до [9] оцінку параметрів ІП можливо здійснювати по полям кореляційного аналізу за яскравістю (ПКАЯ), за контрастом (ПКАК) та їх сукупністю (ПКА).

Розглянемо окремо порядок одержання таких полів.

При використанні ПКАЯ представимо яскравість зображення ПВ, як $S_{ПВ}(k, l)$. Максимальне значення КВК, що відповідає обраним зображенням, обчислюється за класичним кореляційним алгоритмом для кожного (i, j) відповідно до виразів:

$$K_{ij}(k, l) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{m=1}^{N_1} \sum_{n=1}^{N_2} S_{KB_{ij}}(m, n) \times S_{ПВ}(m+k-1, n+l-1), \quad (1)$$

$$\mathbf{K}_{ij} = \left\| K_{ij}(k, l) \right\| \quad (2)$$

при $k = 1 \dots M_1 - N_1$, $l = 1 \dots M_2 - N_2$.

Для кожної одержаної матриці \mathbf{K}_{ij} визначається її максимальне значення, яке забезпечується при повному суміщенні $S_{KB_{ij}}$ та $S_{ПВ}$:

$$K_{\max}(i, j) = \max_{kl} \left\| K_{ij}(k, l) \right\|, \quad (3)$$

де $i = \overline{1, M_1 - N_1}$, $j = \overline{1, M_2 - N_2}$;

$$S_{KB_{ij}}(m, n) \in S_{ПВ};$$

$$S_{ПВ}(m+k-1, n+l-1) \in S_{ПВ};$$

$S_{KB_{ij}}$ та $S_{ПВ}(k, n)$ мають однакові розміри $(N_1 \times N_2)$ та відрізняються положенням на зображенні $S_{ПВ}$ на (k, l) елементів розділення.

У такому випадку утворене ПКАЯ описується виразом:

$$\mathbf{K}_{ПКАЯ} = \left\| K_{\max}(i, j) \right\|. \quad (4)$$

Одержана матриця (2) розміром $(M_1 - N_1) \times (M_2 - N_2)$, яка характеризує розподіл $K_{\max}(i, j)$, являє собою ПКАЯ.

При використанні контрасту в якості інформативного параметру опису ПВ процес формування КВК має аналогічний вигляд [11], а визначення максимального елемента КВК контрастів при послідовному зсуві ковзного вікна визначається відповідно до виразу:

$$\mathbf{K}_{ПКАК} = \left\| K_{\max}(i, j) \right\|. \quad (5)$$

Визначення ділянок ПВ для побудови ЕЗ комбінованої КЕСН передбачає пошук максимальних значень ПКАЯ та ПКАК. У цьому випадку вирішальні правила щодо пошуку координат таких ділянок по ПКАЯ та ПКАК можуть бути записані у вигляді:

$$\hat{r}_y = \arg \max_{i,j} \left(\mathbf{K}_{ПКАЯ_n} \right), \quad (6)$$

$$\hat{r}_k = \arg \max_{i,j} \left(\mathbf{K}_{ПКАК_n} \right), \quad (7)$$

де \hat{r}_y та \hat{r}_k – оцінки координат ділянок прив'язки за полями яскравості та контрасту.

Для оцінки параметрів ІП може використовуватися ПКА, яке утворюється, як результат адамарового (поелементного) множення матриць $\mathbf{K}_{ПКАЯ}$ та $\mathbf{K}_{ПКАК}$, у відповідності з виразом:

$$\mathbf{K}_{ПКА} = \mathbf{K}_{ПКАЯ} \circ \mathbf{K}_{ПКАК} = \left\| K_{ПКАЯ}(i, j) \cdot K_{ПКАК}(i, j) \right\|. \quad (8)$$

Такий підхід дозволяє при проведенні досліджень ІП виділяти об'єкти зображення ПВ, які мають одночасно максимальні унікальні властивості як за яскравістю, так і за контрастом.

Але використання $\mathbf{K}_{ПКА}$ можливе в умовах наявності стійких контрастів на ПВ, які для неспотворених ділянок місцевості можуть мати місце в радіолокаційних КЕСН.

Однак необхідно враховувати, що формування зображень ПВ залежить від просторового положення та орієнтації БпЛА, тримірної форми об'єктів ПВ, а також, що випромінювальні властивості матеріалів та підстилюючих поверхонь схильні до флуктуацій, які залежать від добових, сезонних, погодних змін і мають природний характер.

Окрім того, у залежності від впливу природних та штучних спотворень яскравість об'єктів ПВ може суттєво змінюватися та призводити до вирівнювання радіояскравісних температур окремих зон, зникнення

контрастів та до зміни структури РМ зображення ПВ. Також може відбуватися інверсія контрастів зі збереженням структури ПВ. Ці фактори можуть призводити до того, що сформовані ПКАЯ та ПКАК для однакових ділянок ПВ будуть суттєво відрізнятися за своїми властивостями. Будь-яка ділянка ПВ, яка використовується для місцевизначення комбінованої КЕСН БпЛА, має унікальні властивості за яскравістю, контрастом та структурою, тому для перевірки ефективності підходів до оцінки параметрів ПЗ зображень було проведено моделювання.

При моделюванні формування ЕЗ проводилось відповідно до алгоритму формування сукупності ЕЗ по ПКА, що представлений на рис. 1, а порівняння ЕЗ з вихідним зображенням (ВЗ) проводилось відповідно до класичного кореляційного алгоритму. У якості ВЗ при моделюванні було взято зображення в ТВ та РМ діапазоні отримані з висоти 1000 м при куті візування 60° .

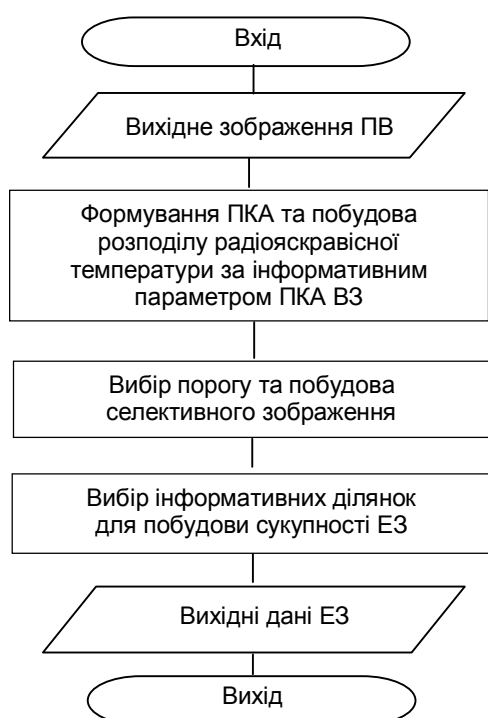


Рис. 1. Алгоритм формування сукупності ЕЗ по ПКА

В результаті моделювання на ВЗ було виявлено ділянки ПВ, які або за показником яскравості, або контрасту можуть бути використанні для побудови сукупності ЕЗ. Відповідні фрагменти ТВ та РМ зображень, які можуть бути використані в якості еталонних для здійснення відповідним каналом комбінованої КЕСН місцевизначення.

Скориставшись класичним кореляційним алгоритмом побудовано ВКФ для РМ та ТВ зображень і відповідних їм селектованим областям ВЗ. Результати порівняння зображень наведені на рис. 2.

Аналіз результатів моделювання ПКА зображень типових ПВ стосовно розвиненої інфраструктури (модель ПВ – сильно об’єктовно насичена), одержаних ТВ та РМ каналами з використанням показників яскравості та контрасту показав, що

стохастичний характер зображень ПВ призводить до формування багатопікової ВФ, що в свою чергу може призводити до зменшення ймовірності місцевизначення комбінованої КЕСН при прив’язці БпЛА. Це означає, що для формування ЕЗ необхідно здійснювати пошук нових інваріантів, які б не мали стохастичний характер, пов’язаний з електрофізичними властивостями ПВ та, відповідно, з яскравістю та контрастом ПВ.

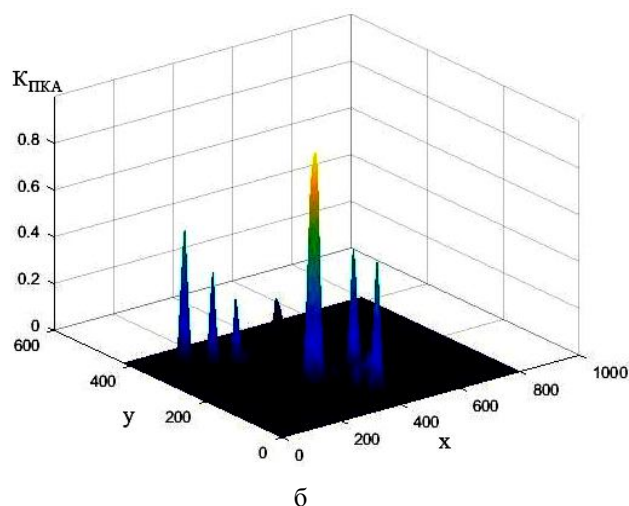
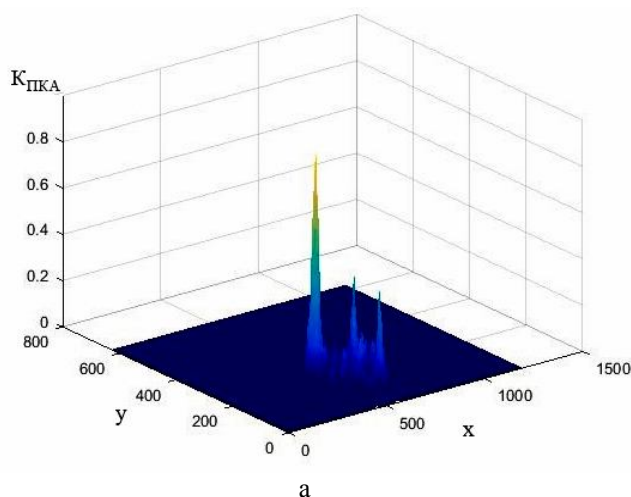


Рис. 2. ВКВ ВЗ з фрагментом селектованої області ВЗ: а – для РМ каналу; б – для ТВ каналу

Таким чином виникає необхідність пошуку додаткової інформативної ознаки для формування ЕЗ ПВ. В якості допоміжної ознаки для формування ЕЗ ПВ з високою об’єктовно насиченістю пропонується використовувати складне ЕЗ, але, у такому випадку сформована ВКФ, яка визначається кількістю фрагментів ЕЗ, не є унімодальною та не визначає, відносно якого її піку потрібно здійснювати місцевизначення.

У такому випадку при розвороті ПЗ відносно ЕЗ у разі використання координат найбільшого значення піку для місцевизначення КЕСН сумарне значення середньоквадратичної похибки (СКП) може бути значним. Це пояснюється не урахуванням двох інших піків ВКФ, що відповідають двом іншим фрагментам ЕЗ.

Виходячи з цього геометричні ознаки (відстані) відносного розміщення фрагментів ЕЗ використовувати не можливо.

З метою використання в якості інваріантів геометричних ознак яскравих стаціонарних об'єктів ПВ для формування ЕЗ та відповідно ВФ комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації пропонується ввести поняття геометрично пов'язаних об'єктів шляхом їх оконтурювання з подальшим визначенням для такого еквівалентного об'єкту його середньої яскравості (радіотеплової температури).

Такий підхід дає змогу не здійснювати перетворення подібності на опорному просторі для безлічі зсунутих та повернутих еталонних зображеннях, щоб при порівнянні з фрагментом ПЗ підібрати екземпляр еталонного зображення, що найбільшою мірою відповідає порівнюваному фрагменту.

В якості інформативної ознаки введеного таким чином ОП будемо використовувати середнє значення яскравості для ТВ каналу та середнє значення радіояскравісної температури для РМ каналу.

ВКФ вихідного зображення та фрагмента ЕЗ з еквівалентним ОП для РМ та ТВ каналів представлені на рис 3.

Таким чином, результати порівняння фрагменту ЕЗ з використанням геометрично пов'язаних об'єктів з ВЗ ПВ підтвердили ефективність запропонованого методу формування ЕЗ для комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації з ТВ та РМ каналами, в якому, на відміну від відомих, формування ЕЗ з додатковою геометричною ознакою досягається побудовою селективних зображень ПВ з використанням стаціонарних об'єктів прив'язки, які створюють допоміжні геометричні інваріанти.

Встановлено, що у разі застосування еквівалентного ОП ВКФ не має багатопіковості. При цьому повне співпадіння фрагмента еталонного зображення з ВЗ забезпечує відсутність впливу масштабних та перспективних спотворень об'єктів ПВ на результат порівняння.

У відповідності до формалізованої моделі опису процесу функціонування комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації [5] та методу формування єдиного еталонного зображення, формування ВФ окремими каналами потребує здійснення попередньої обробки ПЗ з метою приведення останнього до виду, наближеному до еталонного зображення.

Першим етапом такої обробки є урахування спотворення ПЗ, які виникають внаслідок роботи БНС, відповідно до [10].

До етапу підготовки ПЗ РМ каналу можна також віднести процес формування ПЗ, який враховує тримірну форму об'єктів візування, що в загальному випадку призводить до появи нових границь в межах одного об'єкту візування при незначних висотах польоту БпЛА. Врахування тримірної форми об'єктів візування в РМ каналі відбувається відповідно до [5].

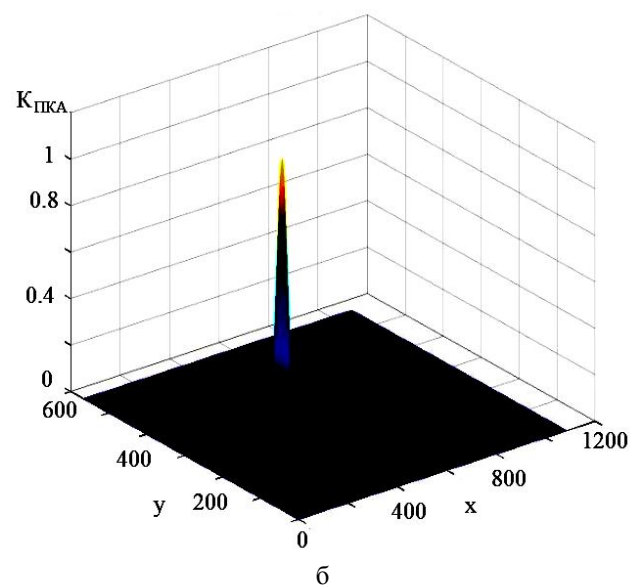
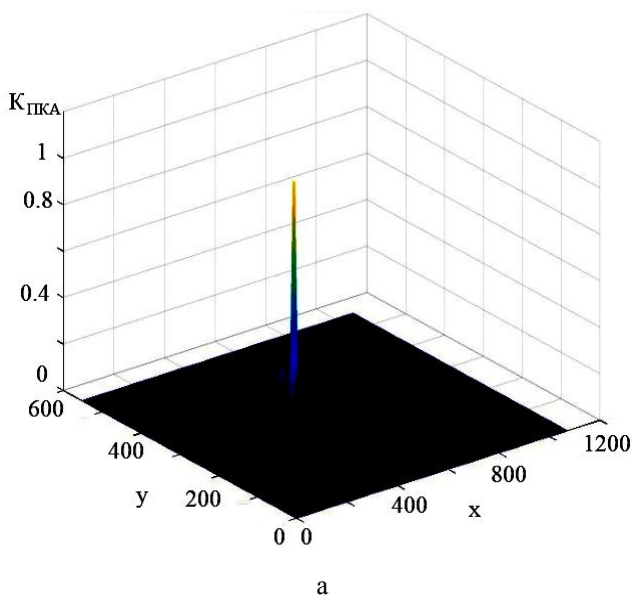


Рис. 3. КВК сформованого еквівалентного ОП та ВЗ: а – для ТВ каналу; б – для РМ каналу

Наступним етапом підготовки ПЗ їх максимальне наближення до виду ЕЗ.

Відповідно до радіометричного ПЗ це означає, що в результаті його обробки на зображенні необхідно визначити необхідну сукупність об'єктів з найбільшим значенням радіояскравісної температури $T_{ЯП}(i, j)_{\max}$, на основі якої в подальшому буде сформований еквівалентний ОП, як показано вище, та відповідно нове ПЗ.

Для цього, з урахуванням чутливості радіометра ΔT та його динамічного діапазону $T_{ЯП}(i, j)_{\max} - T_{ЯП}(i, j)_{\min}$ визначимо середнє значення радіояскравісної температури фонові частини зображення $T_{фсер}$ та здійснимо квантування радіояскравісних температур об'єктів зображення. При здійсненні квантування значення обраних рівнів сірого буде визначатися числом обраних інтервалів k .

Зробимо квантування радіояскравісних температур ПЗ шляхом розбиття температурного діапазону

$$T_{ЯП}(i, j)_{\max} - T_{\phi_{сер}}$$

на рівномірні інтервали $\Delta T_{Я}$:

$$\Delta T_{Я} = \frac{T_{ЯП}(i, j)_{\max} - T_{\phi_{сер}}}{k}, \quad (9)$$

де $k = 10...20$ – кількість рівнів квантування; $\Delta T_{Я} > \Delta T$.

Відповідно до визначених найбільших значень радіояскравісних температур об'єктів сформуємо поточне зображення $S_{PM}(M_1, M_2)$, яке будемо вважати вихідним.

Для сукупності яскравих об'єктів розрахуємо середнє значення радіояскравісної температури та представимо на зображенні геометрично пов'язані об'єкти у вигляді еквівалентного ОП з усередненим значенням яскравості по його площині. На цьому попередня обробка ПЗ завершується.

Далі для заданого порогу l перетворимо вихідне ПЗ $S_{PM}(M_1, M_2)$ у бінарне зображення \mathbf{H} відповідно до правила:

$$H_i = \begin{cases} 1, S_i \leq S_p - l; S_i > S_{\max}; \\ 0, S_{\max} > S_i > S_p - l; \end{cases} \quad i \in \overline{1, F_0}, \quad (10)$$

де i – номер фрагмента ПЗ зайнятий ОП;

p – номер фрагмента ПЗ зайнятий фоном;

F_0 – об'єм вибірки, яка утворює два класи ω_i , що не перетинаються між собою та відповідають сигналам об'єкта прив'язки ω_u та фона ω_p .

Поріг квантування визначає величини ймовірності появи помилок першого α та другого β роду. У свою чергу величини α та β визначають мінімальне значення параметра сигнал/шум $q = q_{\min}$, при якому досягається потрібна величина ймовірності правильної локалізації ОП на зображенні [11]:

$$q_{\min} = \Phi^{-1}(1 - \alpha) + \Phi^{-1}(1 - \beta), \quad (11)$$

де
$$\alpha = \int_{S_{\omega} - l}^{\infty} \omega_u(S) dS;$$

$$\beta = \frac{1}{1 + K} \int_{-\infty}^{S_{\omega} - l} [\omega_p(S) + K \omega_u(S)] dS;$$

$$K = \frac{F_p}{F_u}.$$

По ймовірностях α та β можна визначити ймовірність правильної локалізації ОП, яка може розглядатися функцією порогу l і бути мінімізована вибором відповідного порогу $l = l_{\text{опт}}$.

Використовуючи апріорну інформацію у вигляді бінарного ЕЗ вирішимо задачу селекції ОП на

бінарному ПЗ на фоні менш яскравих об'єктів та сформуємо ВФ.

Для цього здійснимо порівняння визначених відповідно до порогу фрагментів ПЗ $\mathbf{H}^i \subset \mathbf{H}$ з найбільшим значенням яскравостей з ЕЗ, які також повністю складаються з одиниць.

В такому випадку вирішальне правило полягає у тому, що фрагмент $\mathbf{H}^i \subset \mathbf{H}$, для якого:

$$z_j = \sup_{i \in \overline{0, M}} z_i, \quad (12)$$

оголошується співпадаючим з ЕЗ.

Щоб оцінити ймовірність правильної локалізації ОП скористаємось результатами роботи [11]. Відповідно до цієї роботи розіб'ємо матрицю ПЗ на прямокутні матриці меншого розміру $T_1 \times T_2$.

Припустимо, що істинне положення еквівалентного ОП попадає в одну з підматриць, та позначимо через $\mathbf{H}^0 \subset \mathbf{H}$ фрагмент ПЗ, що відповідає ЕЗ, а через \mathbf{H}^i , $i \in \overline{1, M}$ – фрагменти, що розміщені у інших підматрицях.

Нехай ймовірність появи одиниці у \mathbf{H}^i дорівнює γ_i . Тоді числа z_i розподілені по біноміальному закону.

Таким чином ймовірність правильної локалізації ОП P_l при використанні вирішального правила (12) дорівнює ймовірності того, що число одиниць z_0 , що відповідає співпадінню ЕЗ та об'єкта, перевищить решту чисел z_i , $i \in \overline{1, M}$.

$$P_l = \sum_{j=1}^{F_u} C_{F_u}^j (1 - \alpha)^j \alpha^{F_u - j} \times \left[\sum_{m=0}^{j-1} C_{F_u}^m \beta^m (1 - \beta)^{F_u - m} \right]^M. \quad (13)$$

Таким чином, розроблено метод формування ВФ, що на відміну від відомих, полягає в здійсненні попередньої обробки ПЗ, в основу якої покладено його розшарування відповідно до порогу квантування відносно середнього значення радіояскравісної температури фона та побудова селективного зображення групи геометрично пов'язаних об'єктів з подальшим формуванням бінарного ПЗ необхідного для формування ВФ.

Результати оцінки ймовірності правильної локалізації ОП з використанням еквівалентного ОП з усередненням яскравості по сукупності геометрично пов'язаних об'єктів показав, що застосування в якості допоміжної геометричної ознаки на зображенні в умовах нечіткої структури ПЗ дозволяють забезпечити ймовірність правильної локалізації ОП близьку до одиниці при значеннях відношення с/ш від 3 до 4 при умові, що геометрично пов'язаний об'єкт складає не більше 30% від всієї площини ПЗ.

Висновки

1. Розроблено метод формування ЕЗ району прив'язки безпілотного літального апарата, який

забезпечує можливість формування ВФ як для радіометричного, так і телевізійного каналів формування поточного зображення, що досягається побудовою селективних зображень ПВ з використанням стаціонарних об'єктів прив'язки, які створюють допоміжні геометричні інваріанти та забезпечують підвищення точності місцевизначення безпілотного літального апарата шляхом їх адаптації як до перспективних, так і до масштабних спотворень зображень об'єктів поверхні візування.

2. Розроблено метод формування унімодальної ВФ комбінованої КЕСН, який враховує тримірну форму об'єктів ПВ, зміну просторового положення і орієнтації безпілотного літального апарата. Розроблений метод на відміну від відомих базується на здійсненні попередньої обробки ПЗ, яка полягає в його розшаруванні відповідно до порогу квантування відносно середнього значення радіояскравісної

температури фону та побудові сукупності селективних зображень групи геометрично пов'язаних об'єктів з визначенням їх середніх значень радіояскравісних температур в межах введеного еквівалентного ОП та формуванні сукупності бінарних поточних зображень, необхідних для формування вирішальної функції.

3. Чисельні оцінки ймовірності правильної локалізації ОП з використанням еквівалентного ОП з усередненням яскравості по сукупності геометрично пов'язаних об'єктів показали, що застосування в якості допоміжної геометричної ознаки на зображенні в умовах нечіткої структури поточного зображення дозволяють забезпечити ймовірність правильної локалізації ОП близьку до одиниці при значеннях відношення сигнал/шум від 3 до 4 при умові, що геометрично пов'язаний об'єкт складає до 30% від площини ПЗ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Безвесільна О. М. Пошуки шляхів підвищення точності автоматичних кутвимірювальних засобів: Монографія / О. М. Безвесільна. – Житомир, ЖДТУ, 2010. – 225 с.
2. Воздушная разведка наземных целей беспилотными летательными аппаратами / Л. М. Артюшин, Ю. К. Ребрин, В. Б. Толубко, А. Ю. Уваров, Ю. М. Черных. – К.: НАОУ, 2004. – 244 с.
3. Боевое использование разведывательных БПЛА США и других стран НАТО / Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах их выявления. Серия: Технические средства разведывательных служб зарубежных государств // ЕИБ ВИНТИ. – 2002. – № 5. – С. 12-15.
4. Аналитический обзор. Некоторые итоги боевых действий авиации НАТО в Югославии. – 2000. – 22 с.
5. Мосалев В. Подразделение БЛА “Феникс” сухопутных войск Великобритании / В. Мосалев // ЗВО. – 2000. – № 8. – С. 18-19.
6. Сотников А. М. Обобщенная модель процесса функционирования матричных радиометрических корреляционно-экстремальных систем навигации миллиметрового диапазона / А. М. Сотников, А. Н. Быков, Я. Н. Кожушко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ навігації і управління, 2009. – Вип. 13. – С. 13-17.
7. Сотников О. М. Модель опису процесу функціонування комбінованої кореляційно-екстремальної системи навігації безпілотного літального апарату / О. М. Сотников, О. І Тимочко, О.Б. Танцюра, О.В. Федін // Військово-технічний збірник Львівської академії Сухопутних Військ – 2018. – №18. – С. 32-40
8. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, – 2006. – 616 с.
9. Танцюра О. Б. Аналіз методів комплексування різноспектральних зображень з використанням універсального показника якості / О. Б. Танцюра // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. — 2016. — № 4. — С. 152-156.
10. Сотников А. М. Обоснование принципов построения и разработка модели корреляционно-экстремальной системы наведения комбинированного типа / А. М. Сотников, В. А. Таршин // Системи управління навігації та зв'язку. – К., 2012. – № 4(24). – С. 7-11.
11. Таршин А. В. Подготовка эталонных изображений для высокоточных корреляционно-экстремальных систем навигации на основе использования прямого корреляционного анализа / А. В. Таршин, А. М. Сотников, Р. Г. Сидоренко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. — 2015. — № 2(19) — С. 69-73.
12. Sotnikov A. M. Calculating method of error calculations of the object coordinating platform free inertial navigation systems of unmanned aerial vehicle / A. M. Sotnikov, A. B. Tantsiura, O. Yu. Lavrov // Сучасні інформаційні системи. – 2018. – Т. 2, № 1. – С. 105-110.
13. Sotnikov A. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, № 9 (87). – P. 68-74.

REFERENCES

1. Bezvesilna O.M. Poshuki shlyakhiv pidvishchennya tochnosti avtomatichnikh kutovimiryuval'nikh zasobiv: Monografiya. - Zhitomir, ZHDUTU, 2010. – 225 p.
2. Vozdushnaya razvedka nazemnykh tseley bespilotnymi letatel'nymi apparatami / L.M. Artyushin, Yu.K. Rebrin, V.B. Tolubko, A.YU. Uvarov, YU.M. Chernykh. – K.: NAOU, 2004. – 244 p.
3. Boyevoye ispol'zovaniye razvedyvatel'nykh BPLA SSHA i drugikh stran NATO / Inostrannaya pechat' ob ekonomicheskoy, nauchno-tekhnicheskoy i voyennom potentsiale gosudarstv-uchastnikov SNG i tekhnicheskikh sredstvakh ikh vyvayleniya. Seriya: Tekhnicheskkiye sredstva razvedyvatel'nykh sluzhb zarubezhnykh gosudarstv // YEIB VINITI. – 2002. – № 5. – P. 12-15.
4. Analiticheskiy obzor. Nekotoryye itogi boyevykh deystviy aviatsii NATO v Yugoslavii. – 2000. – 22 p.

5. Mosalev V. Podrazdeleniye BLA "Feniks" sukhoputnykh voysk Velikobritanii // ZVO. – 2000. – № 8. – P. 18-19.
6. A.M. Sotnikov Obobshchennaya model' protsessu funktsionirovaniya matrichnykh radiometricheskikh korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistem navigatsii millimetrovogo diapazona / Sotnikov A.M., Bykov A.N., Kozhushko YA.N./ Sistemi upravlinnya, navigatsii ta z'vyazku. K.: TSNDI navigatsii i upravlinnya, 2009. – Vip.13(11). – P. 13-17.
7. Sotnikov O. M. Model' opisu protsesu funktsionuvannya kombinovanof korelyatsiyno-yekstremal'noof sistemi navigatsii bezpilotnogo lital'nogo aparatu / O. M. Sotnikov, O. I Timochko, O.B. Tantsyura, O.V. Fedin // Viys'kovo-tekhnichnyi zbirnik Lvys'koof akademii Sukhoputnykh V'ys'k – 2018. – №18. – P. 32-40
8. Gonsales R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy v srede MATLAB / R. Gonsales, R. Vuds, S. Eddins. – M.: Tekhnosfera, 2006. – 616 p.
9. Tantsyura O. B. Analiz metodiv kompleksuvannya riznospektral'nykh zobrazhen' z vikoristannyam univerval'nogo pokaznika yakosti / O. B. Tantsyura // Nauka i tekhnika Povitryanikh Sil Zbroynikh Sil Ukraini. — 2016. — № 4. — P. 152-156.
10. Sotnikov A. M. Obosnovaniye printsipov postroyeniya i razrabotka modeli korrelyatsionno-ekstremal'noy sistemy nave-deniya kombinirovannogo tipa / A. M. Sotnikov, V. A. Tarshin // Sistemi upravlinnya navigatsii ta z'vyazku. – K., 2012. – № 4(24). – P. 7–11.
11. Tarshin A. V. Podgotovka etalonnykh zobrazheniy dlya vysokotochnykh korrelyatsionno-ekstremal'nykh sistem navigatsii na osnove ispol'zovaniya pryamogo korrelyatsionnogo analiza / A. V. Tarshin, A. M. Sotnikov, R. G. Sidorenko // Nauka i tekhnika Povitryanikh Sil Zbroynikh Sil Ukraini. — 2015. — № 2(19) — P. 69-73.
12. Sotnikov A. M. Calculating method of error calculations of the object coordinating platform free inertial navigation systems of unmanned aerial vehicle / Sotnikov A. M., Tantsiura A. B., Lavrov O. Yu // Advanced Information Systems. – 2018. – Vol. 2, No. 1. – P. 105-110.
13. Sotnikov A. A method for localizing a reference object in a current image with several bright objects / A. Sotnikov, V. Tarshyn, N. Yeromina, S. Petrov, N. Antonenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 3, № 9 (87). – P. 68-74.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Козелков,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 14.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.04.2018

Метод вторичной обработки корреляционно-экстремальных систем навигации беспилотных летательных аппаратов

А. М. Сотников, А. Б. Танцюра

Разработан метод формирования эталонного изображения района привязки беспилотных летательных аппаратов, который обеспечивает возможность формирования решающей функции как для радиометрического, так и для оптико-электронного каналов формирования текущих изображений. Формирование эталонных изображений предложено совершать путем построения селективных изображений совокупности наиболее ярких стационарных объектов поверхности визирования, которые создают дополнительные геометрические инварианты и обеспечивают повышение точности местоопределения беспилотного летательного аппарата путем их адаптации как к перспективным, так и к масштабным искажениям изображений поверхности визирования. Разработано метод формирования унимодальной решающей функции комбинированной корреляционно-экстремальной системы навигации, который учитывает трехмерную форму объектов поверхности визирования, смену пространственного положения и ориентации беспилотного летательного аппарата и ошибки, обусловленные определением местоположения бесплатформенных инерциальных систем навигации.

Ключові слова: корреляционно-экстремальная система навигации, беспилотный летательный аппарат, эталонное изображение, геометрические инварианты, текущее изображение, селективное изображение, решающая функция.

Method of secondary processing in correlation-extremal navigation systems of unmanned aerial vehicle

A. Sotnikov, A. Tantsiura

For the synthesis of reference images to calculate the coordinates of the intersection points of the axes of directional diagrams partial antenna system from the ground and determine the type of underlying surface for each such point identification according to aerial photographs. **The purpose of the article** is to develop a method for the formation of reference images of combined correlation-extreme navigation systems using geometrically related objects as an invariant informative feature and a method for forming a unimodal solving function that takes into account the three-dimensional form of the surface of objects of vision and the change of spatial position and orientation safe little apparatus. **Research results.** A method is developed for the formation of a reference image of the docking area for unmanned aerial vehicles, which provides the possibility of forming a decisive function for both radiometric and optoelectronic channels for the formation of current images. The formation of reference images is suggested to be performed by constructing selective images of the set of the brightest stationary objects of the sighting surface that create additional geometric invariants and provide an increase in the accuracy of the positioning of the unmanned aerial vehicle by adapting them to both perspective and to large-scale distortions of the sighting surface images. A method is developed for the formation of a unimodal decision function of a combined correlation-extreme navigation system that takes into account the three-dimensional shape of the sighting object objects, the change in the spatial position and orientation of the unmanned aircraft, and errors due to the location of the free-of-charge inertial navigation systems.

Keywords: correlation-extreme navigation system, unmanned aerial vehicle, reference image, geometric invariants, current image, selective image, decision function.

Дистанційне зондування Землі

УДК 629.7.072.8

doi: 10.26906/SUNZ.2018.3.016

О. А. Машков, Ю. В. Мамчур

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ РОЗРОБКИ ТРЕНАЖЕРІВ ПІДГОТОВКИ ОПЕРАТОРІВ ДИСТАНЦІЙНО-ПІЛОТОВАНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

В статті розглядаються питання створення тренажерів дистанційно-пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Обґрунтовується необхідність створення спеціалізованих тренажерів екологічного моніторингу навколишнього середовища та техногенно небезпечних об'єктів. Розглядається функціональне призначення спеціалізованого тренажера екологічного моніторингу. Розглядаються особливості роботи оператора на тренажері екологічного моніторингу при керуванні польотом дистанційно пілотованого літального апарату. Запропоновано критерії оцінки спеціалізованого тренажера екологічного моніторингу. Обґрунтовується модульність конструктивної побудови тренажера екологічного моніторингу. Сформульовано проблеми сертифікації спеціалізованого тренажера при вирішенні різних завдань екологічного моніторингу. Стверджується, що сертифікація тренажера дистанційно пілотованого літального апарату повинна підтвердити відповідність тренажера вимогам стандартів, при цьому виробник повинен забезпечити якість у реальних умовах власного виробництва. Досвід міжнародної співпраці при виробництві та використанні тренажерів свідчить про необхідність єдиних вимог до сертифікації тренажерів. Сьогодні потрібна розробка нових вимог щодо візуалізації на тренажері моніторингової обстановки та до запізнювання інформації при керуванні бортовим спеціалізованим обладнанням. Адаптація міжнародних стандартів до оцінки тренажера екологічного моніторингу дозволить створювати навчальні системи та засоби, які є конкурентноспроможні на світовому ринку авіаційних тренажерів. Програма сертифікації тренажера екологічного моніторингу повинна містити методологічну та організаційну частини.

Ключові слова: дистанційно пілотований літальний апарат, імітатор візуальної обстановки, імітатор динаміки польоту, навколишнє середовище, оператор, модуль, тренажер, екологічний моніторинг, техногенно небезпечний об'єкт.

Вступ

У теперішній час має місце порушення стійкості системи «людина - природа - суспільство». Це обумовлено істотним деструктивним впливом людства на стан навколишнього середовища в результаті надмірного зростання продуктивних сил і кількісного зростання чисельності населення. Все це призводить до величезного посилення антропогенного навантаження на екосистеми Землі і до незворотних змін у всій біосфері. Інтенсивний розвиток науково-технічного прогресу зумовило виникнення низки глобальних екологічних проблем. Кожна з них здатна привести до знищення нашої цивілізації. Серед цих проблем найбільш пріоритетними є: дефіцит прісної води, зниження видового біологічного і ландшафтного різноманіття планети, парниковий ефект, озонові діри, кислотні дощі, забруднення Світового океану, опустелювання, загибель лісів тощо. Одним з основних шляхів реалізації концепції сталого розвитку суспільства вважається впровадження на всіх організаційних рівнях науково обґрунтованої системи екологічного і соціально-економічного менеджменту. Для цього служить система екологічного та соціально-економічного моніторингу [1-4].

Система моніторингу повинна в інформаційному плані забезпечити організацію необхідних інформаційних потоків і поліпшити спостереження за основними процесами і явищами в біосфері. Для прийняття раціональних управлінських рішень необхідною умовою є наявність якісного інформаційного

забезпечення по динаміці різних показників, що характеризують стан навколишнього середовища. При цьому, всі негативні тенденції, що відбуваються в розвитку складної системи «людина - природа - суспільство», підвищують актуальність як екологічного, так і соціально-економічного моніторингу.

Аналіз літератури. Сьогодні в якості суб'єкта моніторингу застосовуються різні технічні засоби (аерокосмічні системи, наземні мобільні і стаціонарні комплекси). У роботі розглядаються проблеми створення тренажерів для підготовки оператора управління літаками екологічного моніторингу. Великий внесок у вирішення проблем вдосконалення авіаційних тренажерів внесли вчені: Меєрович Г.Ш., Красовський О.А., Кудіненко А.В., Синєглазов В.М., Баранов Г.Л., Азарсков В.М., Ільїн О.Ю., Кононов О.А., Саваневич В.Є. Тупкало В.М. та інші [5-10].

В даний час у зв'язку з бурхливим розвитком комп'ютерних технологій тренажери стають інтелектуальними людино-машинними системами. В сучасних тренажерах, що розробляються на базі інформаційних технологій, впроваджуються елементи людино-машинного інтелекту, використовуються системи імітації зовнішньої обстановки, що забезпечують ефект занурення у віртуальну реальність, застосовуються автоматизовані системи об'єктивного контролю в реальному масштабі часу з аналізом рівня на тренуваності, створюються оптимальні електронні інструктори і автоматизовані навчальні системи. Сьогодні головна проблема екологічного моніторингу в умовах стрімкого розповсюдження дистанційно-піло-

тованих літальних апаратів (ДПЛА) - гостра нестача кваліфікованих операторів як самого апарату, так і цільової апаратури. При наявності високого попиту на ДПЛА і працюють з ними операторів фактично сьогодні відсутня розвинена система підготовки фахівців. Чи не налагоджено виробництво відповідних тренажерів та іншого обладнання. При цьому необхідна розробка методик і програм підготовки фахівців, в тому числі з використанням тренажерів різних типів екологічного моніторингу [1, 2].

Завдяки досвіду експлуатації ДПЛА різних типів, накопиченому фірмами розробниками, потрібен переклад процесу підготовки операторів ДПЛА екологічного моніторингу на новий організаційний і технологічний рівень. У перспективі слід розглянути питання створення навчально-тренувального центру для підготовки операторів різних типів ДПЛА екологічного моніторингу. Основні викладаються теоретичні і практичні курси повинні бути спрямовані на навчання фахівців для обслуговування безпілотних авіаційних систем, підготовку операторів-пілотів і операторів цільової навантаження ДПЛА екологічного моніторингу [3].

Метою статті є обґрунтування напрямків розробки спеціалізованих тренажерів екологічного моніторингу для підготовки операторів керування дистанційно-пілотованими літальними апаратами.

Виклад основного матеріалу

Необхідність створення тренажерів екологічного моніторингу. Тренажер ДПЛА є високоорганізоване технічний засіб навчання, тому важливо оцінити наскільки близько в ньому відтворюються характеристики реального літака. Незважаючи на наявність ряду вітчизняних і зарубіжних публікацій, присвячених відповідності характеристик тренажера реальному літальному апарату, завдання про необхідного ступеня даного відповідності, а також вироблення критеріїв по оцінці адекватності характеристик, поки ще розглянуті недостатньо. Як зазначалося вище, отримання об'єктивної кількісної оцінки тренажера ДПЛА на сьогоднішній день пов'язане з великим обсягом випробувань і великою кількістю контрольованих параметрів. Тому існує необхідність в розробці автоматизованої системи випробувань в складі тренажера. Точність відтворення характеристик в тренажері ДПЛА в першу чергу залежить від закладеної моделі динаміки польоту. Імітатор динаміки польоту тренажера повинен дозволити відтворювати всі етапи польоту літака: зліт, набір висоти, політ за маршрутом, зниження, захід на посадку, посадку і руління. У тренажері ДПЛА найбільшого поширення набули математичні моделі динаміки польоту, засновані на рішенні нелінійних диференціальних рівнянь. До особливостями імітації руху ДПЛА при навчанні оператора на тренажері можна віднести імітацію позаштатних і аварійних ситуацій, імітацію граничних режимів і збурень повітряного середовища, облік впливу нових органів управління, відмови бортового обладнання [5-10].

Швидкий розвиток обчислювальних засобів і нових технологій призвело до створення генераторів тривимірного зображення. Якість і деталізація гене-

рується зображення повинні бути настільки високі, щоб дозволити льотчиків на тренажері прищеплювати навички візуального пілотування на всіх режимах польоту і застосовувати обладнання для моніторингу. До складу тренажерного комплексу має входити обладнання реального наземного пункту управління ДПЛА і відповідна апаратна і програмна частина розробки, включаючи унікальну систему візуалізації, що дозволяє з високою точністю імітувати географічні та кліматичні особливості районів моніторингу. У імітаторі візуальної обстановки база ділянок навколишнього природного середовища та техногенної небезпечна об'єктів повинна постійно поповнюватися. Як показали дослідження в основу системи візуалізації тренажера екологічного моніторингу може бути покладена розробка, названа Physics Based Environment Generator HD - один з продуктів в лінійці HD World. У тренажері необхідно з високою точністю і деталізацією генерувати різну підстилаючої поверхню, включаючи промислові об'єкти, рельєф місцевості і навіть імітувати різноманітні, характерні для конкретної ділянки місцевості погодні умови. Необхідно розробити і ввести в дію різні організаційно-штатні заходи та заохочувальні програми, які повинні сприяти підвищенню престижу професії оператора ДПЛА і оператора цільової навантаження ДПЛА [4].

Функціональне призначення тренажера екологічного моніторингу. Відпрацювання вправ на тренажері передбачає управління ДПЛА при вирішенні таких завдань екологічного моніторингу:

- моніторинг атмосферного повітря;
- моніторинг водних ресурсів;
- контроль і оцінка збереження біологічного і ландшафтного різноманіття, розвиток природно-заповідного фонду та формування національної екологічної мережі;
- моніторинг земельних ресурсів та ґрунту;
- контроль і оцінка використання надр;
- контроль і оцінка поведінки з відходами;
- моніторинг за станом екологічної безпеки техногенно небезпечних об'єктів і підприємств;
- моніторинг впливу промислових підприємств на навколишнє середовище;
- моніторинг впливу об'єктів сільського господарства на навколишнє середовище;
- моніторинг впливу об'єктів енергетичного комплексу на навколишнє середовище;
- моніторинг впливу транспорту на навколишнє середовище;
- виявлення і контроль за ходом ліквідації та усунення наслідків надзвичайних ситуацій (стихійні лиха, пожежі, повені та ін.)

На тренажері екологічного моніторингу одночасно можуть відпрацьовувати навички фахівці трьох напрямків [5-9].

1. Оператор траєкторного управління. Оператор управління апаратом задає курс польоту, висоту, виробляє маневри.

2. Оператор управління цільової навантаженням. У його завдання входить безпосередньо ведення розвідки за допомогою тих чи інших сенсорних

блоків (відео апаратура, інфрачервона техніка, засоби радіолокації).

3. Технік безпілотного апарату. Він готує ДПЛА до польоту і здійснює пуск і посадку (при необхідності). Підготовка всіх цих трьох категорій фахівців і ведеться в одному тренажерному комплексі. І якщо місце техніка завжди поруч з «залізом», то оператори спочатку навчаються в класах за дисплеями тренажерів. При цьому оператор траєкторного управління змінює траєкторію руху ДПЛА на електронній карті місцевості, в той час як картинку з камери в реальному часі отримує оператор управління цільової навантаженням.

Навчальна програма підготовки операторів на тренажері винна передбачати: основи управління ДПЛА; ручний і напівавтоматичний політ; ручний і автоматичний польот і посадка; польот за заданими координатами GPS; маневрування і обхід перешкод; безпечне наближення до об'єкта; аварійна посадка апарату; фото- і відеозйомки з ДПЛА; практичні заняття з інструктором.

Для вдосконалення навичок операторів ДПЛА в тренажері повинен бути реалізований курс завдань екологічного моніторингу. Інструктор повинен мати можливість імітувати в тренажері виникнення різних нештатних (аварійних) ситуацій в ході виконання учнем навчального завдання екологічного моніторингу навколишнього природного середовища та техногенне небезпечних об'єктів. Тренажер екологічного моніторингу повинен дозволяти здійснювати практичне навчання оператора ДПЛА на виконання наступних функцій:

- проведення автономного функціонального контролю бортового комплексу спеціальної апаратури для моніторингу;
- створення, редагування і введення польотно-го завдання в ДПЛА;
- коригування польотно-го завдання в ході польоту ДПЛА;
- формування команд управління польотом ДПЛА;
- формування команд управління цільовою навантаженням;
- запис параметричної та видової інформації з бортового пристрою реєстрації;
- робота при виникненні аварійних ситуацій;
- аналіз зареєстрованої інформації та підготовка звіту.

На тренажері повинні імітуватися процеси управління спеціальним обладнанням: суміщені гіростабілізовані відео-, фото, ІК-камери та інше цільове навантаження. Залежно від встановленого цільового навантаження тренажерний комплекс може використовуватися для імітації виявлення надзвичайних ситуацій; контролю стану територій, на яких проходять нафто- і газопроводи; боротьби з браконьєрством; вирішення завдань земельного кадастру та картографування; контролю державного кордону, включаючи суцільні лісові масиви; моніторингу сільськогосподарських угідь; контролю ліній електропередач і стану атмосфери; зйомки відеофільмів і природних ландшафтів та ін.

Управління польотом ДПЛА на тренажері має дозволяти відпрацьовувати такі режими:

- контроль польоту в автоматичному режимі (без участі оператора відповідно до введеного польотно-го завдання, в тому числі і виконання посадки);
- політ в автоматизованому режимі (під управлінням та по командах оператора);
- аварійне припинення польоту і повернення ДПЛА в заданий район при недоцільності подальшого виконання завдання, в тому числі і виконання посадки.

У складі тренажера слід передбачити: автоматизоване робоче місце оператора ДПЛА (макет штатного варіанта наземного пункту управління), рис. 1; засоби документування; спеціальне обладнання.



Рис. 1. Автоматизоване робоче місце оператора ДПЛА: а – система управління; б – засоби моніторингу

Особливості роботи оператора на тренажері екологічного моніторингу. Використання ДПЛА з метою екологічного моніторингу стало одним з важливих напрямків розвитку безпілотної авіації і дозволяє автоматизувати моніторинг навколишнього середовища та техногенне небезпечних об'єктів, скоротити час отримання моніторингової інформації [10].

У зв'язку з цим актуальною є задача створення мобільних, простих в експлуатації і дешевих засобів ведення екологічного моніторингу. Проведені дослідження показують, що сам повітряний моніторинг не має альтернативи. Контроль за станом трубопроводів і інших об'єктів, завдання охорони, моніторингу та відеоспостереження найкраще вирішуються із застосуванням літальних апаратів. Окреме питання при екологічному моніторингу: коли здійснювати картографування місцевості, а коли доцільно знімати поточе відео? Картографування має сенс при веденні моніторингу з великих висот ширококутної камерою з великою матрицею; в інших випадках переважно вести відеозйомку, тим більше, що сучасні відеопрограми дозволяють працювати з отриманим зображенням покадрово.

Аналіз свідчить, що нічний моніторинг із застосуванням тепловізора або чутливої ІК-камери не отримав широкого поширення через три причини:

1. Складність нічного пілотування.
2. Високої вартості обладнання.
3. Складності дешифрування отриманої інформації, особливо в умовах високої щільності об'єктів спостереження.

Тепловізор має сенс застосовувати на спеціальних апаратах (як правило, коптерах), при моніторингу техногенне небезпечних об'єктів, об'єктів критичної інфраструктури в нічний час в обмеженому районі. Управління ДПЛА малого розміру представляє найбільш важке завдання. Наприклад, при управлінні апаратом вагою 3,5 кг оператор повинен забезпечувати проходження по маршруту з відхиленням, що не перевищує 10-15 метрів при швидкості вітру 7 м/с. При польоті по маршруту оператор повинен забезпечувати точність підтримки висоти в межах 5 метрів на малих висотах і з огибанням рельєфу.

Ще однією важливою функцією управління ДПЛА на тренажері є керування відеокамерою. У польоті стабілізація камери переднього огляду забезпечується відпрацюванням коливань ДПЛА по крену за сигналами автопілота і даними інерціальної навігаційної системою. Таким чином картинка відео зображення виявляється стабільною, незважаючи на коливання ДПЛА по крену. У завданнях аерофотозйомки (наприклад, при складанні аерофотоплана передбачуваного району проведення робіт) точна інформація про кути орієнтації, координатах і висоті ДПЛА абсолютно необхідна для корекції аерофотознімків, автоматизації зшивання кадрів. Перенесення основного обсягу навчання льотної складу на тренажері приводе до того, що питання сертифікації авіаційних тренажерів придбали першорядне значення. При цьому обсяг випробувань, які необхідно здійснити, і обсяг інформації, яку необхідно отримати і обробити, настільки великий, що без автоматизації процесу випробувань обійтися практично неможливо. Необхідною умовою для проведення подібних автоматизованих випробувань є розробка і застосування методик оцінки і корекції параметрів польоту в авіаційних тренажерах. Оцінка характеристик тренажера не обмежується тільки сертифікаційними випробуваннями, а повинна проводитися періодично і під час експлуатації тренажера з метою підтвердження відповідності його характеристик необхідним.

Критерії оцінки тренажера. Сьогодні існують такі критерії оцінки тренажера ДПЛА: - критерії, за якими здійснюється об'єктивна (кількісна) оцінка відмінностей між характеристиками реального ДПЛА і тренажера без участі льотчиків; - критерії, за якими здійснюється суб'єктивна (якісна) оцінка відмінностей між ДПЛА і тренажером. Дотримання кількісних допусків на точність моделювання є необхідною умовою сертифікації тренажера по одному з рівнів.

Для побудови та отримання характеристик моделі динаміки польоту літака в авіаційних тренажерах слід використовувати рівняння динаміки польоту. Дані рівняння складаються з рівнянь динаміки руху центру мас в проекціях на осі зв'язаної системи координат, рівнянь руху відносно центру мас в проекціях на осі зв'язаної системи координат, а також ряду кінематичних рівнянь і рівнянь проекцій сил і моментів, що діють на літак. Перенесення центру ваги навчання на тренажері вимагає суворого підходу до атестації цих засобів. Необхідність розробки таких методик і застосування їх для оцінки характеристик тренажера обумовлені наступним:

1. Оцінка характеристик тренажера не є разовою і не обмежується тільки сертифікаційними випробуваннями, а повинна проводитися періодично і під час експлуатації тренажера з метою підтвердження відповідності його характеристик необхідним.

2. Принциповим при випробуваннях є питання точного введення керуючих впливів. При управлінні літальним апаратом підбір даних керуючих впливів вимагає великих витрат часу і пов'язаний зі значними методичними похибками.

3. Скорочення термінів розробки тренажерів також вимагає перенесення більшості випробувань на комп'ютерні засоби.

4. Обсяг льотної оцінки, за допомогою якої здійснюється комплексна оцінка тренажера, може бути істотно знижений, якщо їй будуть передувати автоматизовані випробування на основі методів об'єктивної оцінки окремих імітаторів і систем тренажера.

Модульність тренажера екологічного моніторингу. Розробка тренажерів, як правило, здійснюється виходячи з його модульності. Концепція модульності передбачає можливість об'єднання, поділу та модифікації окремих системних елементів без їх впливу на систему в цілому [5-9].

При модульній архітектурі системні модулі можуть створюватися незалежно один від одного і об'єднуватися в блоки для отримання необхідних результатів. Полегшується їх реконструкція і модернізація при зміні вимог до них без істотного впливу на інші модулі (наприклад, при зміні обладнання для екологічного моніторингу можна обмежитися відповідними змінами в модулі «спеціальне обладнання» тренажера). Однак зусилля по модульній побудові систем не досягнуть мети без чіткого визначення взаємозв'язків між модулями, вимог для розробки та впровадження модулів, а також елементів інтерфейсу (дозволяють введення нових технологій з урахуванням поглядів їх творців, а також експлуатуючих організацій). Необхідна реалістичність моделювання вимагає досить швидкої реакції на вхідні впливи, що викликає великі навантаження на обчислювальну систему з виконання всіх операцій в реальному масштабі часу. Модульний підхід накладає додаткові обмеження, пов'язані з приведенням даних в сумісну форму, на систему в цілому. Обчислення можуть розподілятися між різними процесорами. При цьому повинна існувати можливість створення нових необхідних модулів на основі єдиного підходу для забезпечення сумісності модулів один з одним. Модулі та інтерфейс можуть розглядатися з функціональної точки зору (логічний рівень) або як набір апаратних і програмних модулів (фізичний рівень). Передача інформації може інтерпретуватися як ряд повідомлень між функціональними модулями, тому на логічному рівні розглядається зміст повідомлень, визначаються передають і приймають модулі, а також умови, при яких здійснюється передача повідомлень. На цьому ж рівні визначаються питання точності та об'єкти моделювання.

Модульний принцип побудови тренажера дозволяє модернізувати різні підсистеми, наприклад модулі візуалізації без зміни логічної структури тренажера. Форми фізичного зв'язку можуть бути різні-

ми. Вибір універсального фізичного зв'язку є однією з основних задач розробника тренажера. Вирішення питання про взаємодію модулів по суті є рішенням задачі передачі даних від модуля до модуля. Для їх зв'язку необхідна схема сполучення. Якщо прийомачій та передавальній елементи системи знаходяться в різних фізичних модулях, то інформація може передаватися через локальні мережі. Якщо елементи розташовані в тісно взаємодіючих фізичних модулях (наприклад, две ЕОМ однієї системи), то повідомлення можуть передаватися через пристрої зовнішньої пам'яті або високошвидкісну мережу передачі даних. Якщо обидва логічних модуля знаходяться всередині однієї фізичної підсистеми, то інформація може передаватися через операційну систему. При цьому у всіх випадках повідомлення повинні бути однаковими за обсяги, формату та умов передачі. Найбільші зусилля витрачаються на забезпечення мобільності програмного забезпечення. При цьому очевидна необхідність мови для обслуговування систем тренажера.

Модуль імітатора динаміки польоту. У модулі відтворюється рух літака в просторі (рішення замкнутої системи нелінійних диференціальних рівнянь; вхідні параметри - дії оператора ДПЛА, вихідні - параметри польоту). У модулі моделюються: зліт і набір висоти; політ за маршрутом, зниження та заходження на посадку; відхід на друге коло (з використанням засобів комплексу пілотажно-навігаційного обладнання); екстрене зниження; політ по колу, захід на посадку і посадка; політ при небезпечних зовнішніх впливах. У модулі повинні враховуватися: температура повітря і атмосферний тиск; висота (рівень місцевості) аеродрому; горизонтальна складова швидкості вітру; зрушення і пориви вітру (вертикальний і горизонтальний); режими роботи спеціальної апаратури і силової установки; становище керуючих поверхонь. Модуль імітатора візуальної обстановки. Модуль призначений для імітації рельєфу місцевості, візуалізація об'єктів моніторингу (навколишнього природного середовища, техногенної небезпечна об'єктів). Візуалізація повинна бути реалізована в тривимірній (просторової) моделі. Сама модель повинна відповідати реальним об'єктам і реальної місцевості. Таку модель можливо реалізувати на основі аерокосмічних знімків та ГІС-технологій.

Модуль імітатора системи управління. Функціональний модуль призначається для управління польотом на тренажері і надання оператору ДПЛА навичок по використанню системи управління, видачі інформації у взаємодіючі системи та забезпечує: розрахункове визначення положення рульових поверхонь (органів управління) параметрів польоту і параметрів, які формуються імітатором обчислювальної системи управління польотом; автоматичне обмеження граничних режимів польоту, а також попередження оператора ДПЛА про вихід за межі основних експлуатаційних режимів польоту; імітацію характерних відмов. У модулі забезпечується імітація роботи каналів управління (при наявності стабілізатори, керма висоти, елерони, інтерцептори, кермо напрямку). У модулі імітуються ймовірні відмови реальної системи управління літака.

Модуль імітатора силової установки. Модуль забезпечує відтворення роботи: маршових двигунів, системи автоматичного регулювання. Імітація здійснюється на основі математичного моделювання характеристик силової установки в обчислювачі тренажера.

Проблеми сертифікації тренажера екологічного моніторингу. Сертифікація тренажера ДПЛА повинна підтвердити відповідність виробів вимогам стандартів і що виробник в змозі стабільно забезпечувати заявлене ним якість в реальних умовах свого виробництва. Сьогодні вітчизняні вимоги найбільш слабо представлені до моделювання візуальної обстановки і до величинам запізнювання пропонованої інформації. Адаптація міжнародних стандартів до оцінки тренажера екологічного моніторингу дозволить створювати навчальні системи і засоби, конкурентоспроможні на світовому ринку авіаційних тренажерів.

Програма сертифікації тренажера екологічного моніторингу повинна складатися з методологічної та організаційної частин. Методологічна частина сертифікації тренажера екологічного моніторингу повинна включати в себе розробку:

1. Методів оцінки відповідності характеристик тренажера, його систем, імітаторів обладнання об'єктивним вимогам норм придатності при проведенні лабораторних, стендових, автономних і комплексних сертифікаційних випробувань.

2. Методів оцінки відповідності вимогам до придатності кабіни тренажера, імітаторів динаміки польоту, акустичних шумів, системи візуалізації.

3. Методів та засобів забезпечення об'єктивних випробувань і експертних оцінок, орієнтовні умови виконання залікових режимів.

4. Методики обробки результатів випробувань і заходів щодо забезпечення їх безпеки.

5. Положення про сертифікацію.

6. Норм придатності тренажера екологічного моніторингу.

7. Сертифікаційних вимог і методів оцінки відповідності систем тренажера умов функціонування: злітно-посадкових коштів, силової установки, навігаційних систем і літакових систем.

8. Типових програм випробувань.

9. Стандартизованих банків вихідних даних і результатів сертифікаційних випробувань.

10. Структури лабораторно-дослідницької бази.

11. Єдиної програми льотного експерименту.

12. Тактико-технічних вимог до імітатора тренажера.

Апаратна частина системи сертифікації повинна бути оснащена лабораторно-випробувальним обладнанням з набором автоматизованих програм збору, обробки, зберігання, формування експертних оцінок та документування інформації про результати випробувань.

Висновки

Пропонується створювати спеціалізовані тренажери екологічного моніторингу з використанням дистанційно пілотованих літальних апаратів. Створювати тренажери екологічного моніторингу слід за аналогією з авіаційними тренажерами. Особливу увагу слід при-

ділити системі візуалізації реальної обстановки (модель місцевості і об'єкти моніторингу) і роботі з бортовим обладнанням для моніторингу. В роботі розглянуті питання функціонального призначення тренажера екологічного моніторингу (області застосування). Сформульовано особливості роботи оператора на тре-

нажері екологічного моніторингу та критерії оцінки тренажера.

Пропонується здійснювати побудову тренажера екологічного моніторингу за модульним принципом. Обґрунтовано необхідність сертифікації тренажера екологічного моніторингу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. <http://tekhnosfera.com/metodiki-otsenki-i-korreksii-parametrov-poleta-v-aviatsionnyh-trenazherah#ixzz53lkKByK>
2. <http://www.dissercat.com/content/metodika-formirovaniya-upravlyayushchikh-otsenki-letno-tekhnicheskix-ixzz53lktV9KR>
3. <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-integrirovannykh-sredstv-mashinogo-obucheniya-ixzz53lmmuFoX>
4. www.indelauav.com/news.html
5. Боднер В.А. Авиационные тренажеры / В.А. Боднер, Р.А. Закиров, И.И. Смирнова – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.
6. Авиационные тренажеры / А.А. Красовский и др. – М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 1992. – 320 с.
7. Красовский А.А. Пилотажно-навигационные и комплексные тренажеры / А.А. Красовский, А.В. Кудиненко – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1984. – 204 с.
8. Красовский А.А. Основы теории авиационных тренажеров / А.А. Красовский – М.: Машиностроение, 1995. – 304 с.
9. Красовский А.А. Пилотажно-навигационные и комплексные тренажеры / А.А. Красовский. – М.: ВВИА, 1998. – 320 с.
10. Мамаев В.Я. Болевые точки тренажеростроения и возможные пути их устранения / В.Я. Мамаев // Мир авионики. – 2003. – № 1. – С. 38-39.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Барабаш,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 6.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.04.2018

**Обоснование направлений разработки тренажеров подготовки операторов
дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов экологического мониторинга**

О. А. Машков, Ю. В. Мамчур

В статье рассматриваются вопросы построения тренажеров дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов экологического мониторинга. Обосновывается необходимость создания специализированных тренажеров экологического мониторинга окружающей среды и техногенно опасных объектов. Рассматривается функциональное назначение специализированного тренажера экологического мониторинга. Раскрываются особенности работы оператора на тренажере экологического мониторинга при управлении полетом дистанционно пилотируемого летательного аппарата. Предложены критерии оценки специализированного тренажера экологического мониторинга. Обосновывается модульность конструктивного построения тренажера экологического мониторинга. Сформулированы проблемы сертификации специализированного тренажера при решении различных задач экологического мониторинга. Показывается, что сертификация тренажера дистанционно пилотируемого летательного аппарата должна подтвердить соответствие тренажера требованиям стандартов, при этом изготовитель должен обеспечивать заявленное им качество в реальных условиях своего производства. Опыт международного сотрудничества при производстве и использовании тренажеров показывает необходимость разработки единых требований к сертификации тренажеров. Сегодня необходима разработка новых требований к визуализации на тренажере мониторинговой обстановки и к величинам запаздывания информации при управлении бортовым специализированным оборудованием. Адаптация международных стандартов к оценке тренажера экологического мониторинга позволит создавать обучающие системы и средства, конкурентоспособные на мировом рынке авиационных тренажеров. Программа сертификации тренажера экологического мониторинга должна состоять из методологической и организационной частей.

Ключевые слова: дистанционно пилотируемый летательный аппарат, имитатор визуальной обстановки, имитатор динамики полета, окружающая среда, оператор, модуль, тренажер, экологический мониторинг, техногенно опасный объект.

**The substantiation of development directions of operators preparation simulators
for remote-pilot aircraft equipment for ecological monitoring**

O. Mashkov, Yu. Mamchour

The questions of construction of simulators of remotely piloted aircrafts of ecological monitoring are considered. The necessity of creating specialized simulators of environmental monitoring of environment and technologically dangerous objects is substantiated. The functional purpose of the specialized simulator of ecological monitoring is considered. The peculiarities of the operator's work on the simulator of environmental monitoring in the flight control of a remotely piloted aircraft are disclosed. The criteria for assessing the specialized simulator of environmental monitoring are proposed. The modularity of the constructive construction of the simulator of environmental monitoring is substantiated. The problems of certification of a specialized simulator for solving various problems of environmental monitoring are formulated. It is shown that the certification of the simulator of a remotely piloted aircraft must confirm the conformity of the simulator to the standards, while the manufacturer must ensure the quality declared by him in the actual conditions of his production. The experience of international cooperation in the manufacture and use of simulators shows the need to develop uniform requirements for the certification of simulators. Today, it is necessary to develop new visualization requirements on the simulator of the monitoring situation and to the lag of information when controlling the on-board specialized equipment. Adaptation of international standards to the assessment of environmental monitoring simulator will allow creating training systems and facilities that are competitive in the world market of aviation simulators. The certification program for the environmental monitoring simulator should consist of a methodological and organizational part.

Keywords: remotely piloted aircraft, visual environment simulator, flight dynamics simulator, environment, operator, module, simulator, environmental monitoring, technologically dangerous object.

К. В. Сметанін

Житомирський військовий інститут імені С.П. Корольова, Житомир, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ

Предметом вивчення в статті є розгляд особливостей використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) при проведенні екологічного моніторингу для оптимізації проведення спостережень техногенних об'єктів та виконання екологічних завдань в системі екологічного моніторингу. Це можливо здійснити за допомогою висвітлення позитивних та врахування негативних властивостей при застосуванні БПЛА в системі екологічного моніторингу. **Метою** є розкриття особливостей використання БПЛА в екологічному моніторингу та визначення напрямків їх застосування для проведення контролю за параметрами стану навколишнього природного середовища заданих територій. **Завдання:** провести аналіз можливості використання БПЛА в системі екологічного моніторингу; висвітлити особливі властивості застосування БПЛА в системі спостереження; визначити можливості БПЛА для формування процедури проведення екологічного моніторингу та визначити коло екологічних завдань для їх вирішення за допомогою БПЛА; розглянути можливості застосування БПЛА в системі спостереження та знімання параметрів навколишнього середовища, що є підґрунтям для проведення робіт, що пов'язані з проведенням екологічного моніторингу. Використовуваними **методами** є: системний підхід до розробки складних систем, проведення порівняльного аналізу параметрів та властивостей БПЛА, математичні моделі оптимізації для побудови складних систем. Отримані такі **результати**. Проведено порівняльний аналіз властивостей БПЛА, висвітлення процесу обробки інформації в системі екологічного моніторингу при здійсненні вибору оптимальної структури системи екологічного моніторингу за допомогою використання БПЛА. На основі системного аналізу різних технічних показників та властивостей БПЛА можливо здійснити вивчення структурно-параметричних характеристик та дослідити режими роботи літальних апаратів в різних умовах при побудові системи екологічного моніторингу. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: проведено аналіз властивостей БПЛА, визначено характеристики та параметри, що впливають на спостереження в системі екологічного моніторингу, також висвітлено коло питань, які необхідно враховувати при побудові системи екологічного моніторингу з використанням дистанційно керованих літальних апаратів.

Ключові слова: безпілотні літальні апарати, екологічний моніторинг, спостереження, виявлення, визначення характеру впливу, навколишнє природне середовище.

Вступ

У період інтенсивного розвитку господарської діяльності виникає необхідність оцінити вплив і визначити ступінь впливу на навколишнє середовище регіону промисловим виробництвом [1]. Для обліку антропогенного впливу необхідно в першу чергу знати масштаб і глибину впливу на середовище проживання і зміни біосфери Землі. Це призводить до необхідності проведення екологічного моніторингу регіону з можливістю подальшого оцінювання та прогнозування стану довкілля [1, 2].

Термін «моніторинг» був введений ще в 1974 році, відповідно якого вивчався стан природного середовища, і, в першу чергу, забруднень і процесів, що впливають на біосферу [2]. При цьому, під моніторингом розуміється комплексна система регулярних тривалих спостережень у просторі і в часі, що дає інформацію про минулий та сьогоdnішній стан навколишнього середовища [1, 2]. Так само система моніторингу дозволяє здійснити прогнозування змін параметрів зовнішнього середовища під антропогенним впливом, що мають особливе значення для біоти [1, 2].

Аналіз предметної галузі та джерел літератури. Сучасні фундаментальні дослідження [1 – 3] показали, що для достовірної оцінки стану навколишнього середовища необхідно використовувати комплексний підхід до отримання інформації [2]. Комплексний підхід при проведенні моніторингу довкілля надає більшого значення для забезпечення

сталого розвитку території та її екологічної безпеки. В даному випадку можливо стверджувати, що чим більш якісно проведено спостереження (визначення різних параметрів навколишнього природного середовища) тим більш можливо спрогнозувати розвиток дій та наслідків в умовах техногенного впливу. Крім цього, виникають ситуації, коли необхідно оперативно провести і оцінити стан навколишнього середовища в умовах викиду в атмосферне (водне, земне) середовище.

Аналізуючи [1 – 3], можна прийти до висновку, що при проведенні екологічного моніторингу великих територій особливе значення займають дистанційні методи з використанням аерокосмічних технологій. При цьому, інформація, що поступає з дистанційних літальних апаратів (незалежно від застосування чи то космічних, чи то авіаційних) залежить від несучих бортових систем. Однак до гідності безпілотних авіаційних систем, є не тільки оперативне їх використання в заданому районі, а й можливість спостереження з поточною діяльністю реального часу з можливістю знімання параметрів стану навколишнього середовища. Таке уявлення дозволяє отримати системне уявлення даних і чіткіше оцінити антропогенний вплив на стан навколишнього середовища.

Мета статті. Тому метою статті є розкриття особливостей використання безпілотних літальних апаратів в екологічному моніторингу та визначення напрямків їх застосування при проведенні контролю за параметрами стану навколишнього природного середовища заданих територій.

Виклад основного матеріалу

Аналіз основних науково-дослідних робіт і дослідно-конструкторських розробок свідчить про реалізацію спрямованих досліджень на створення і застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) щодо наявних (несучих) бортові навантаження [1]. Основа використання БПЛА базується на різній бортовій апаратурі, оснащеній телевізійними камерами, біохімічними, радіаційними та акустичними датчиками та інших спеціалізованих датчиках [1, 2].

В даний час створення БПЛА поки не вийшло зі стадії завершених концептуальних досліджень [1]. Так багато фахівців вважають, що застосування БПЛА в більшій мірі залежить від того навантаження, яке несуть на собі бортові системи. Однак, необхідно розуміти, що рішення поставлених завдань також можуть залежати від функціональних можливостей БПЛА (в тому числі і по передачі інформації). Крім цього, від принципів функціонування БПЛА можуть змінюватися як якісні, так і кількісні характеристики цільового призначення [1, 2].

Також світові виробники проводять роботи, спрямовані на створення перспективних зразків і розвиток БПЛА. Так на сучасному етапі проявилася тенденція, пов'язана з удосконаленням бортових засобів обробки інформації, які призводять до створення необхідних коштів обміну інформацією. Це пов'язано з іншими технологічними рішеннями: чим повніше буде здійснено обробку інформації на борту БПЛА, тим менші обсяги інформації доведеться передавати на пункти управління [3]. Крім цього, виділяється напрямок пов'язаний з вдосконаленням бортових засобів обробки інформації щодо розпізнавання об'єктів, що є першочерговим на етапах автоматичного управління, пов'язаних з повною автоматизацією процесів управління режимами польоту БПЛА [4].

Також розглядаються питання, пов'язані з порушенням зв'язку БПЛА. Наприклад, якщо в процесі вильоту відбулася втрата зв'язку з командним літаком або наземним пунктом, бортова система автоматичного управління безпілотного літального апарату повинна самостійно прийняти рішення і забезпечити продовження польоту до об'єкта спостереження або повернення в район посадки [3].

З огляду на все вищесказане можна виділити основні напрямки досліджень, що проводяться, які вивчають питання, пов'язані з [1, 2]: розробкою і вдосконаленням системи автоматичного розпізнавання різних об'єктів (з урахуванням рішення найпростіших завдань, в тому числі і автоматичне категорювання різних об'єктів); забезпеченням надійного радіозв'язку БПЛА з пунктом управління (наземним або повітряним); наданням БПЛА властивостей, що дозволяє враховувати зміни в навколишньому середовищі при виконанні завдань в автономному режимі; розробкою бортові системи обробки інформації, яка могла б з усього потоку надходити на БПЛА спеціалізованих даних виділяти найбільш важливі відомості про об'єкти, що дозволить істотно скоротити обсяг даних при передачі на інші літальні апарати або наземні пункти управління [4]; обробкою програм навігацій-

ного забезпечення БПЛА, які дозволять їм виконувати в польоті в складі групи, або вибрати альтернативні маршрути і здійснити взаємодію з пунктом управління.

Таким чином, основною перевагою застосування БПЛА в ході проведення екологічного моніторингу, є здійснення спостереження з можливим отриманням даних дистанційними приладами [2]. Крім цього, можливість використання БПЛА дає дані про екологічний об'єкт спостереження і місцевості, про стан навколишнього середовища, а також візуалізація спостереженої території і можливість оцінки в реальному масштабі часу.

Інтенсивне застосування БПЛА в екологічному моніторингу пов'язано з розробкою різних приладів і пристроїв для здійснення оцінки стану навколишнього середовища, що дає можливість розширити спектр завдань спостереження з їх використанням. Тому важливим фактором, що визначає можливості контролю і оцінки навколишнього середовища є вибір БПЛА і бортових систем, необхідних для вирішення поставлених завдань для проведення екологічного моніторингу територій [4, 5].

В літературі [4] досить детально представлена класифікація БПЛА і існуючих бортових систем. Однак, на жаль, на сьогоднішній день немає взаємозв'язку характеристик бортових систем БПЛА і їх можливостей для застосування та вирішення конкретних екологічних завдань.

Необхідність визначення цього взаємозв'язку пов'язана з необхідністю не тільки вибору бортових систем БПЛА і їх можливостей застосування, але і пошуку рішення оптимізаційних задач з проведенням екологічного моніторингу та можливістю застосування відповідного інструментарію при прийнятті керуючого рішення для ліквідації наслідків.

Таким чином, розглянемо основні завдання екологічного моніторингу для виявлення і оцінювання антропогенного впливу територій [4]: спостереження за джерелами антропогенного впливу; спостереження за факторами антропогенного впливу; спостереження за станом природного середовища і відбуваються в ній процесами під впливом факторів антропогенного впливу; оцінка фізичного стану природного середовища; прогноз зміни природного середовища під впливом факторів антропогенного впливу і оцінка прогнозованого стану природного середовища.

В табл. 1 представлена взаємозв'язок основних задач при проведенні екологічного моніторингу з можливістю застосування БПЛА. В першу чергу це пов'язано з можливістю проведення дистанційного спостереження за територією, наявністю бортових систем та можливістю їх застосування. Розуміючи, що екологічний моніторинг полягає у визначенні стану навколишнього середовища для оптимізації взаємодії людини з природою, а також у екологічній спрямованості господарської діяльності, необхідно виділити ряд етапів для досягнення та їх реалізації на основі виконання поставлених завдань [5, 6]:

– здійснення планування для проведення екологічного моніторингу за певною (промисловою) територією регіону;

Таблиця 1. Виконання завдань за допомогою БПЛА при проведенні екологічного моніторингу

№	Завдання	Рішення завдань (БПЛА)	Переваги рішення
1.	Спостереження за джерелами антропогенного впливу	Проведення спостереження за екологічним об'єктом, або процесом впливу на навколишнє середовища за допомогою бортових систем	Оперативне проведення спостереження
2.	Спостереження за факторами антропогенного впливу	Застосування різних сучасних бортових пристроїв для виявлення антропогенного впливу	Своєчасність визначення параметрів стану навколишнього природного середовища за допомогою: різної динаміки польоту БПЛА та оптимізації його маршруту польоту, використання різних сучасних пристроїв для визначення впливу
3.	Спостереження за станом природного середовища та що відбуваються в них процесами під впливом факторів антропогенного впливу	Визначення характеру та епіцентру Аналіз стану середовища	Забезпечення в реальному масштабі часу можливості визначення характеру впливу на екологічні об'єкти на основі використання різних бортових пристроїв БПЛА
4.	Оцінювання фізичного стану природного середовища.	Проведення оцінювання стану території	Визначення стану території для прийняття управлінських рішень
5.	Прогноз зміни природного середовища під впливом факторів антропогенного впливу та оцінка прогнозного стану природного середовища	Визначення параметрів поточного стану навколишнього природного середовища для моделювання та прогнозування	Прогнозування поточного стану території та моделювання змін антропогенного впливу на стан території для прийняття управлінських рішень

– визначення вимог до проведення екологічного моніторингу;

- вибір обладнання та бортових систем БПЛА;
- проведення спостережень із застосуванням БПЛА;
- виявлення джерел впливу з використанням бортових систем БПЛА;
- виявлення джерел впливових факторів;
- аналіз параметрів навколишнього середовища з можливістю оцінки її стану;
- прогнозування стану навколишнього середовища для визначення характеру впливу.

На етапі безпосереднього проведення екологічного спостереження, необхідно здійснити [5, 6]:

- вибір об'єкта спостереження;
- детальне вивчення, обстеження, оцінювання даного об'єкта (процесу);
- формування інформаційної моделі, або схеми спостережуваного об'єкта (процесу);
- аналіз стану об'єкта (процесу), ідентифікація його схематичної інформаційної моделі;
- оцінювання складання об'єкта (процесу) моніторингу;
- моделювання можливих змін стану об'єкта (процесу) спостереження;
- розрахунок та систематизація інформації для її передачі на пункт управління.

Крім того, необхідно на підготовчому етапі здійснити:

- метрологічне забезпечення систем БПЛА;
- калібрування бортових систем БПЛА.

На етапі аерозйомки необхідно здійснити рух БПЛА по заданому маршруту з можливістю адаптивно його змінити в разі необхідності. Так само на даному етапі здійснюється попередній розрахунок даних для польоту БПЛА у відповідності отриманих параметрів навколишнього середовища. При цьому, необхідно враховувати: повноту покриття, точність та якість пілотування.

Після передачі спеціалізованих даних на етапах її обробки необхідно провести [3 – 5]: геокодування точок; виділення істинної поверхні Землі, рослинності, водної поверхні; створення ортофотомозаїки; створення семантичних 3D моделей; дешифровка знімків, виділення необхідних контурів об'єктів (процесів). При цьому, перші три етапи обробки є загальнотопографічною обробкою, а наступні є семантичною обробкою.

Висновки

В ході аналізу проведеного дослідження в роботі представлені результати, пов'язані з можливістю використання БПЛА для вирішення екологічних завдань.

Ефективність вирішення екологічних завдань пов'язана з визначенням найбільш повних даних про стан навколишнього середовища та оцінки можливих загроз у регіоні.

Використання БПЛА для визначення та контролю стану навколишнього середовища залежить від бортових систем та їх можливостей для проведення екологічного моніторингу. При цьому виникає необхідність уточнення задач спостереження за станом навколишнього середовища. Це пов'язано з обмеженням бортового навантаження БПЛА та масогабаритними характеристиками бортових приладів.

Крім цього, також виникає ряд питань з рішенням доставки отриманих даних під час проведення спостереження за певною територією. Так як енергетичні характеристики також обмежені за своїми можливостями.

Усі вищеперелічені причини вимушують дотримуватись строгого порядку складання задач екологічного моніторингу та обмежують можливості доставки первинної інформації з БПЛА. Тому в статті представлені результати аналітичного огляду можливості застосування БПЛА в спостереженні та отриманні даних від об'єктів екологічного моніторингу та визначені завдання їх вирішення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клименко М.О. Моніторинг довкілля / М.О. Клименко, А.М. Прищеп, Н.М. Вознюк. – К.: Академія, 2006. – 360 с.
2. Якунина И.В. Методы и приборы контроля окружающей среды. Экологический мониторинг / И.В. Якунина, Н.С. Попов. – Тамбов: Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 188 с.
3. Аерокосмічні дослідження геологічного середовища / А.Г. Мичак, В.Є. Філіпович та ін. – К., 2010. – 246 с.
4. Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов / А.Г. Гребеников, А.К. Мяслица, В.В. Парфенюк и др. – Х.: НАУ им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т». – 2008. – 377 с.
5. Кобрин, Н.В. Применение беспилотных авиационных комплексов для решения экологических задач / Н.В. Кобрин, Т.А. Клочко // Экология и промышленность. – Х. : ГП «УкрНТЦ Энергосталь». – 2014. – № 1 (38). – С. 88 – 90.
6. Геоінформаційні технології в екології / І.В. Пітак, А.А. Негадайлов, Ю.Г. Масікевич та ін. – Чернівці, 2012. – 273 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Барабаш,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 20.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.04.2018

Особенности использования беспилотных летательных аппаратов в экологическом мониторинге

К. В. Сметанин

Предметом изучения в статье является рассмотрение особенностей использования беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) при проведении экологического мониторинга для оптимизации проведения наблюдений техногенных объектов и выполнения экологических задач в системе экологического мониторинга. Это возможно осуществить с помощью выделения положительных и учёта негативных свойств при применении БПЛА в системе экологического мониторинга. **Целью** является раскрытие особенностей использования БПЛА в экологическом мониторинге и определение направлений их применения для проведения контроля за параметрами состояния окружающей природной среды заданных территорий. **Задача:** провести анализ возможности использования БПЛА в системе экологического мониторинга; осветить особые свойства применения БПЛА в системе наблюдения; определить возможности БПЛА для формирования процедуры проведения экологического мониторинга и определить круг экологических задач для их решения с помощью БПЛА; рассмотреть возможности применения БПЛА в системе наблюдения и съёма параметров окружающей среды, что является основой для проведения работ, связанных с осуществлением экологического мониторинга. Используемыми **методами** являются: системный подход к разработке сложных систем, проведение сравнительного анализа параметров и свойств БПЛА, математические модели оптимизации для построения сложных систем. Получены следующие **результаты**. Проведён сравнительный анализ свойств БПЛА, освещён процесс обработки информации в системе экологического мониторинга при осуществлении выбора оптимальной структуры системы экологического мониторинга с помощью использования БПЛА. На основе системного анализа различных технических показателей и свойств БПЛА можно осуществить изучение структурно-параметрических характеристик и исследовать режимы работы летательных аппаратов в различных условиях при построении системы экологического мониторинга. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: проведён анализ свойств БПЛА, определены характеристики и параметры, влияющие на наблюдение в системе экологического мониторинга, также освещён круг вопросов, которые необходимо учитывать при построении системы экологического мониторинга с использованием дистанционно управляемых летательных аппаратов.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, экологический мониторинг, наблюдение, выявление, определение характера воздействия, окружающая природная среда.

Peculiarities of unmanned aerial vehicles application in environmental monitoring

K. Smetanin

The subject of the study in the article is consideration of peculiarities of unmanned aerial vehicles (UAVs) application in carrying out environmental monitoring to optimize the observation of man-made objects and the fulfillment of ecological tasks in the system of environmental monitoring. This can be done by emphasizing positive and taking into account negative properties when using UAV in the environmental monitoring system. The goal is to reveal the features of using UAV in environmental monitoring and to determine the fields of their application for monitoring of surrounding natural environment state in the specified territories. **Task:** to analyze the possibility of using UAV in the system of environmental monitoring; to highlight the special properties of UAV application in the surveillance system; to determine the capabilities of the UAV to formulate the procedure for conducting environmental monitoring and to determine the range of environmental tasks for solving them with the help of UAV; consider the possibility of using UAV in the system of observation and measuring of environmental parameters, which is the basis for conducting work related to the implementation of environmental monitoring. **The methods used are:** a systematic approach to the development of complex systems, a comparative analysis of parameters and properties of UAVs, mathematical optimization models for constructing complex systems. **The following results are obtained.** The comparative analysis of UAV properties is carried out, the process of information processing in the system of environmental monitoring in selecting the optimal structure of the environmental monitoring system using UAV is covered. Based on the system-oriented analysis of various parameters and technical properties of UAV the structural-and-parametric properties can be achieved and the aerial vehicles operation modes may be investigated in different operation conditions during construction of environmental monitoring system. **Conclusions.** The scientific novelty of the results is as follows: the UAV properties are analyzed, the characteristics and parameters influencing the monitoring in the environmental monitoring system are determined, as well as the range of issues to be taken into account when constructing an environmental monitoring system using remotely controlled aircraft.

Keywords: unmanned aerial vehicles, environmental monitoring, observation, detection, determination of the nature of the impact, environment.

І. А. Хижняк¹, О. М. Маковейчук², Г. В. Худов¹

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА РОЙОВА ТЕХНОЛОГІЯ ТЕМАТИЧНОГО СЕГМЕНТУВАННЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ЩО ОТРИМАНІ З БОРТОВИХ СИСТЕМ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Предметом вивчення в статті є інформаційні ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. **Метою** є розробка інформаційної технології сегментування, в основу якої покладений ройовий метод тематичного сегментування оптико-електронного зображення. **Завдання:** аналіз рівнів технології дешифрування оптико-електронного зображення, аналіз основних етапів обробки оптико-електронного зображення та рівнів локалізації об'єктів інтересу на етапі розпізнавання, аналіз основних вимог до тематичних сегментів зображення, аналіз відомих методів та інформаційних технологій сегментування зображень, що отримані з бортових систем спостереження, обґрунтування цільової функції тематичного сегментування та вибору оптимального значення порогу сегментування, розробка інформаційної ройової технології тематичного сегментування зображень, що отримані з бортової системи оптико-електронного спостереження, наведення тестового прикладу тематичного сегментування кольорового зображення. Використовуваними **методами** є: методи теорії імовірності, математичної статистики, ройового інтелекту, кластеризації даних, еволюційних обчислень, методи оптимізації, математичного моделювання та цифрової обробки зображень. Отримані такі **результати**. Встановлено, що основним етапом обробки зображень, що отримані з бортових систем спостереження, є етап тематичного сегментування. Встановлено, що у теперішній час невелика кількість досліджень присвячена вирішенню задачі тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем спостереження. Встановлено, що у якості цільової функції використовується функція, яка визначається як сума дисперсії інтенсивності пікселів в межах кожного тематичного сегменту, а оптимізація полягає у мінімізації цільової функції. В основу інформаційної ройової технології покладені удосконалені методи ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії) тематичного сегментування оптико-електронного зображення та ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії) тематичного сегментування багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: підвищення візуальної якості сегментованого зображення, що в подальшому суттєво впливає на вирішення завдання дешифрування зображення.

Ключові слова: бортова систем спостереження, оптико-електронне зображення, тематичне сегментування, інформаційна технологія, ройові методи, штучна бджолоїна колонія, цільова функція, поріг сегментування, оптимізація, багатомасштабна послідовність.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

Процес дешифрування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження, складається з декількох рівнів та етапів, що ведуть дешифрувальника до розпізнавання об'єктів, а потім до їх загальної оцінки, визначення сутності складного об'єкта і формування інформації про нього [1]. Залежно від властивостей зображення, характеру місцевості і розташованих на ній об'єктів інтересу, кваліфікації дешифрувальника та інших факторів, рівні та етапи дешифрування можуть чітко розділятися чи непомітно переходити з одного в інший [1]. Отже, технологія дешифрування оптико-електронного зображення може бути представлена 4 рівнями [1]:

– 1 рівень – отримання і усвідомлення завдання;

– 2 рівень – структурно-пошуковий аналіз;

– 3 рівень – детальне дешифрування, що включає: виділення зон розташування простих об'єктів, уточнення масштабу зображення, вимірювання розмірів об'єктів та відстаней між ними, розпізнавання за розпізнавальними ознаками, порівняння з еталонами, розпізнавання за аналогіями, інтерпретація даних про прості об'єкти, побудова загальної структури складного об'єкта, оцінка стану об'єкта та характеру його діяльності;

– 4 рівень – загальна оцінка ситуації, що включає: узагальнення даних про складний об'єкт, оформлення інформаційно-звітних документів.

Основними задачами, що суттєво впливають на якість процесу дешифрування, є задачі виявлення і розпізнавання компактних (точкових) та складних (групових) об'єктів інтересу. У загальному випадку задача розпізнавання компактних (точкових) об'єктів інтересу на оптико-електронних зображеннях розглядається як задача аналізу різноманітних характеристик пікселів зображення з використанням об'єктно-орієнтованого або піксельно-орієнтованого підходів [2–5]. З точки зору традиційних етапів обробки цифрових зображень і у відповідності до досліджуваних процесів дешифрування основну увагу необхідно приділити етапам виділення ознак об'єктів, виділення та класифікації безпосередньо об'єктів на зображенні при їх розпізнаванні на відповідних рівнях локалізації (рис. 1) [6–8]. В статті основна увага приділяється етапу розробки інформаційної технології тематичного сегментування, яка, у відповідності з рис. 1, включає етапи сегментування, виділення ознак об'єктів інтересу та семантичного сегментування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі методи сегментування зображення базуються на базовій властивості сигналу яскравості – однорідності та розривності [9–11].

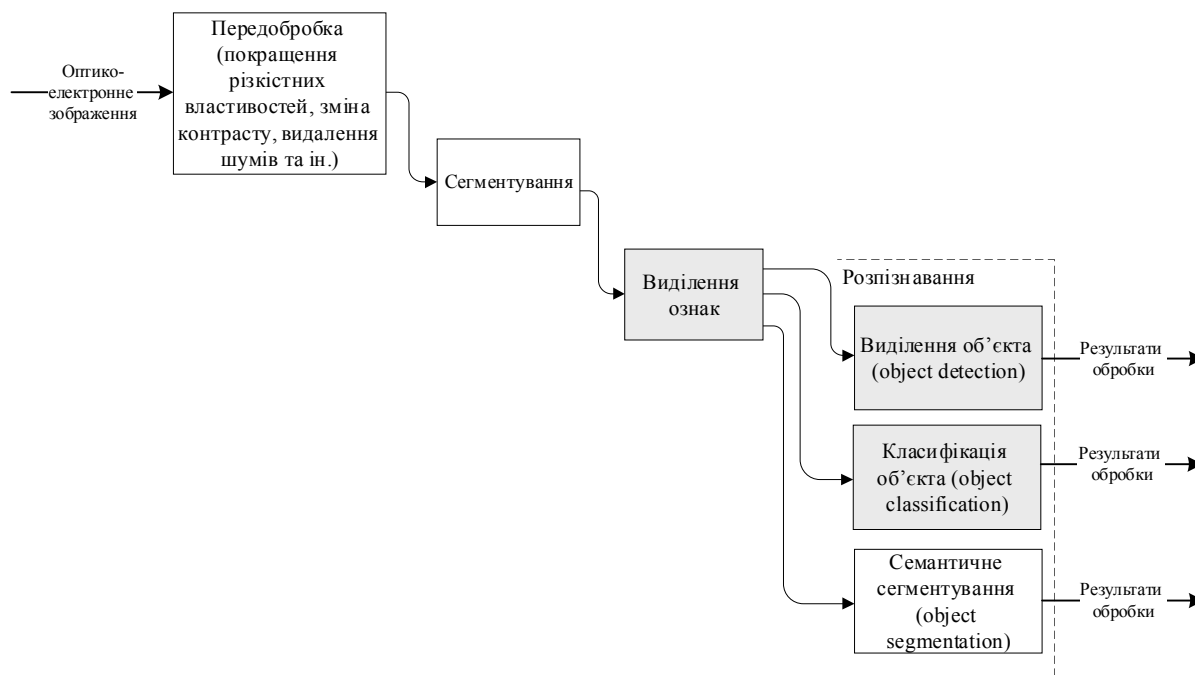


Рис. 1. Етапи обробки оптико-електронних зображень та рівні локалізації об'єктів інтересу на етапі розпізнавання

До областей, що отримані в результаті сегментування оптико-електронного зображення, висуваються такі вимоги [14, 16, 17]:

- області повинні бути однорідні щодо певних характеристик;
- внутрішні частини областей повинні бути простими без великої кількості ядер;
- суміжні області повинні істотно відрізнятися за значеннями обраних характеристик, щодо яких вони вважаються однорідними;
- межі кожного сегменту повинні бути простими, просторово точними.

На практиці при аналізі конкретного зображення виникає необхідність вибору методу сегментування, при цьому доводиться враховувати, як властивості зображення, так і особливості конкретного методу сегментування оптико-електронного зображення. У теперішній час відомі різноманітні методи сегментування [12–14]:

- частотні методи, що засновані на застосуванні двовимірного дискретного перетворення Фур'є;
- метод зворотної проєкції;
- нейромережеві методи;
- метод П.Віоли і М.Джонса;
- метод Н.Далалі і Б.Тріггса;
- ієрархічні методи, засновані на об'єднанні кластерів за принципом їх близькості;
- карти Кохонена, що самоорганізуються;
- виділення контурів на зображенні;
- методи, що засновані на теорії графів та інші.

У теперішній час лише невелика кількість досліджень присвячена вирішенню задачі сегментування зображень, що отримані з бортових систем спостереження [15–21]. Найбільш розповсюдженим є метод поділу та злиття [16–19]. Це пов'язано з низькою трудомісткістю даного методу. У всіх представлених алгоритмах у якості текстурних ознак використовуються бінарні шаблони (Local Binary

Pattern, LBP). В [16] відстань між сегментами визначається за допомогою трьох характеристик, вага яких визначається автоматично: яскравість, текстура та колір. Причому, у якості кольорової характеристики обрана двовірна гістограма тону на насиченості. Метод застосовувався до супутникового зображення, отриманого з космічного апарату QuickBird, розміром (512x512) пікселів. Метод [16] не враховує мультиспектральну складову інформації супутникових даних, що значно обмежує можливості якісного сегментування. Метод [17] передбачає побудову двовірних спектральних та текстурних гістограм за допомогою головних компонент. Метод застосовувався для сегментування мультиспектральних зображень, отриманих з космічних апаратів Ikonos та QuickBird, розміром (256 × 256) пікселів. В [17] відмічається, що параметри текстурних ознак сильно впливають на результат сегментування.

В роботі [18] метод поділу та злиття застосовується без використання стандартних текстурних характеристик. У якості текстурних ознак використовувалась гістограма міток кластерів, що отримані за допомогою нечіткого алгоритму кластеризації Fuzzy ART. Цей метод застосовувався до мультиспектрального зображення, що отримано отриманого з космічного апарату QuickBird, розміром (512 × 512) пікселів. Метод [19] на етапі поділу проводить сегментування зображення за допомогою алгоритму водорозділу. При пороговому об'єднанні сегментів враховуються їх розмір. У якості відстані використовуються відстані між гістограмами кольору та текстури з вагами, що визначаються адаптивно. Метод застосовувався для сегментування зображень, що отримано отриманого з космічних апаратів QuickBird та Spot-5, розміром (400x400) пікселів. Час обробки зображення складає 1 с (методу сегментування JSEG [19] потребується 10 с) (використовувався процесор Intel Core i5, 2,4 ГГц).

В роботах [20, 21] запропоновано декілька спектрально-текстурних методів сегментування супутникових зображень, які засновані на імовірнісно-статистичному підході. В [20] кожен піксель характеризується вектором ознак, що складаються з локальних гістограм фільтрів Габора, лапсасіана та яскравості, що обчислюються для кожного спектрального каналу. Пікселі зображення розглядаються як лінійні комбінації представників класів та відносяться до найбільш схожого представника. Представники можуть бути обрані вручну або знайдені автоматично за допомогою кластеризації методом к-середніх в підпросторі ознак, однак при цьому необхідно задати кількість кластерів. Метод застосовувався до мультиспектрального супутникового зображення, отриманого з космічного апарату Ikonos, розміром (501x501) піксель. Для скорочення обчислення фільтри Габора та лапсасіана розраховувалися тільки для одного каналу пан хроматичного зображення. В результаті було виділено 5 класів: дороги, місця паркування, споруди, дерева і трава. Час обробки зображення склав 150 с (використовувався процесор Intel, 2,6 ГГц). В роботі [20] відмічається, що якість сегментування погіршується при виділенні більшої кількості класів на складних сценах.

Метод [21] у якості ознак використовує фільтри Габора та значення спектральних яскравостей. Виконується кластеризація пікселів в єдиному просторі ознак за допомогою самоорганізуючої карти Кохонена на 40 кластерів. Потім отримані представники кластерів ітеративно об'єднуються ієрархічним методом до отримання заданого числа класів. Метод використовувався для виділення виноградників на мультиспектральному зображенні, що отримано з космічного апарату Spot-5 з розрізненням 2,5 м розміром (1000x1000) пікселів. На відміну від методів поділу та злиття, використання імовірнісно-статистичного підходу дозволяє аналізувати ознаки глобально для всього зображення, що є важливих для великих сцен. Однак цей підхід не враховує взаємне розташування пікселів на зображенні, що знижує робастність сегментування із-за значної локальної зміни спектрально-текстурних характеристик.

В [22] запропоновано інформаційну технологію сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. В основу інформаційної технології сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження, покладено еволюційний метод сегментування зображень та сегментування багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень еволюційним методом [22].

Мета статті – розробити інформаційну технологію, в основу якої покладений ройовий метод тематичного сегментування оптико-електронного зображення.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Поставимо завдання розробки інформаційної технології тематичного сегментування оптико-електронного зображення ройовим методом, у якості

якого виберемо метод штучної бджолиної колонії. Розглянемо спрощену задачу та розглянемо ідеалізований випадок виділення об'єкту інтересу на модельному зображенні (рис. 2), коли розподілення об'єкту і фону розділяються.

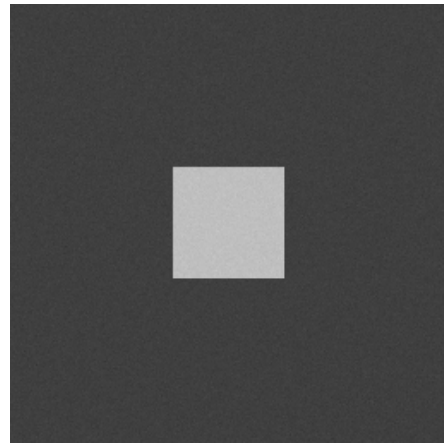


Рис. 2. Модельне зображення об'єкту і фону

Будемо вважати, що інтенсивності пікселів модельного об'єкту (внутрішнього квадрату) і фону розподілені за нормальним розподілом з параметрами:

– для об'єкту: математичне сподівання $\mu_1 = 0,75$, середньоквадратичне відхилення (СКВ) $\sigma_1 = 0,01$;

– для фону: математичне сподівання $\mu_2 = 0,25$, середньоквадратичне відхилення (СКВ) $\sigma_2 = 0,01$.

Тематичне сегментування зображення полягає у визначенні оптимального значення порогу th , що буде розділяти об'єкт від фону. Припустимо, що таке значення порогу знайдено. Тому, біналізуємо зображення (рис. 1) та розглянемо значення дисперсії інтенсивності підпорогових $D_1(th)$ та надпорогових $D_2(th)$ пікселів як функції від порогу th . Для граничних значень порогу $D_1(th=0) = 0$, $D_2(th=0) = D_0$, $D_1(th=1) = D_0$, $D_2(th=1) = 0$, де D_0 - дисперсія модельного зображення.

Значення D_0 можна легко визначити:

$$D_0 = \frac{s_1\mu_1^2 + s_2\mu_2^2}{s_1 + s_2} - \mu_1^2, \quad (1)$$

де s_1 , s_2 - площини (кількість пікселів) об'єкту і фону відповідно на модельному зображенні (рис. 1).

При умові, що розподіли інтенсивності пікселів не перекриваються, повинно виконуватися умова:

$$(\mu_1 - 3\sigma_1) > (\mu_2 + 3\sigma_2). \quad (2)$$

Тоді:

$$D_1((\mu_2 + 3\sigma_2) < th < (\mu_1 - 3\sigma_1)) = \sigma_2^2, \quad (3)$$

$$D_2((\mu_2 + 3\sigma_2) < th < (\mu_1 - 3\sigma_1)) = \sigma_1^2. \quad (4)$$

Розглянемо функцію $D(th) = D_1(th) + D_2(th)$.
Маємо:

$$D(th = 0) = D(th = 1) = D_0, \quad (5)$$

$$D((\mu_2 + 3\sigma_2) < th < (\mu_1 - 3\sigma_1)) = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 < D_0, \quad (6)$$

тобто в інтервалі значень порогу th , де об'єкт відділяється від фону, $D(th) = \min$.

На рис. 3 зображено вигляд функції $D(th) = D_1(th) + D_2(th)$. Отже, для тематичного сегментування об'єкту та фону доцільно для вирішення оптимізаційної задачі знаходження порогу використовувати у якості цільової функції функцію $D(th)$, а оптимізація полягає у знаходженні мінімального значення цієї функції. Таким чином, для тематичного сегментування об'єкту та фону необхідно знайти значення порогу, що відповідає мінімуму цільової функції, яка визначається як сума дисперсій інтенсивності пікселів в межах кожного тематичного сегменту.

Для знаходження оптимального значення порогу будемо використовувати ройовий метод (штучної бджолоїної колонії), сутність якого викладена в [23-

25]. З урахуванням вищезазначеного, на рис. 4 наведена інформаційна ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження.

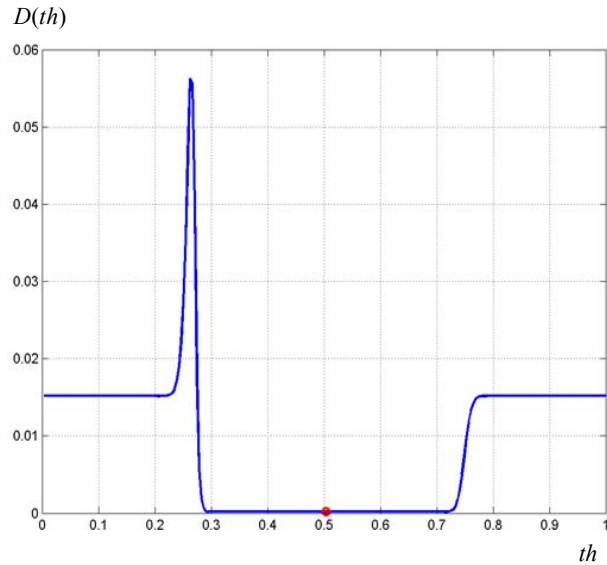


Рис. 3. Вигляд функції $D(th) = D_1(th) + D_2(th)$

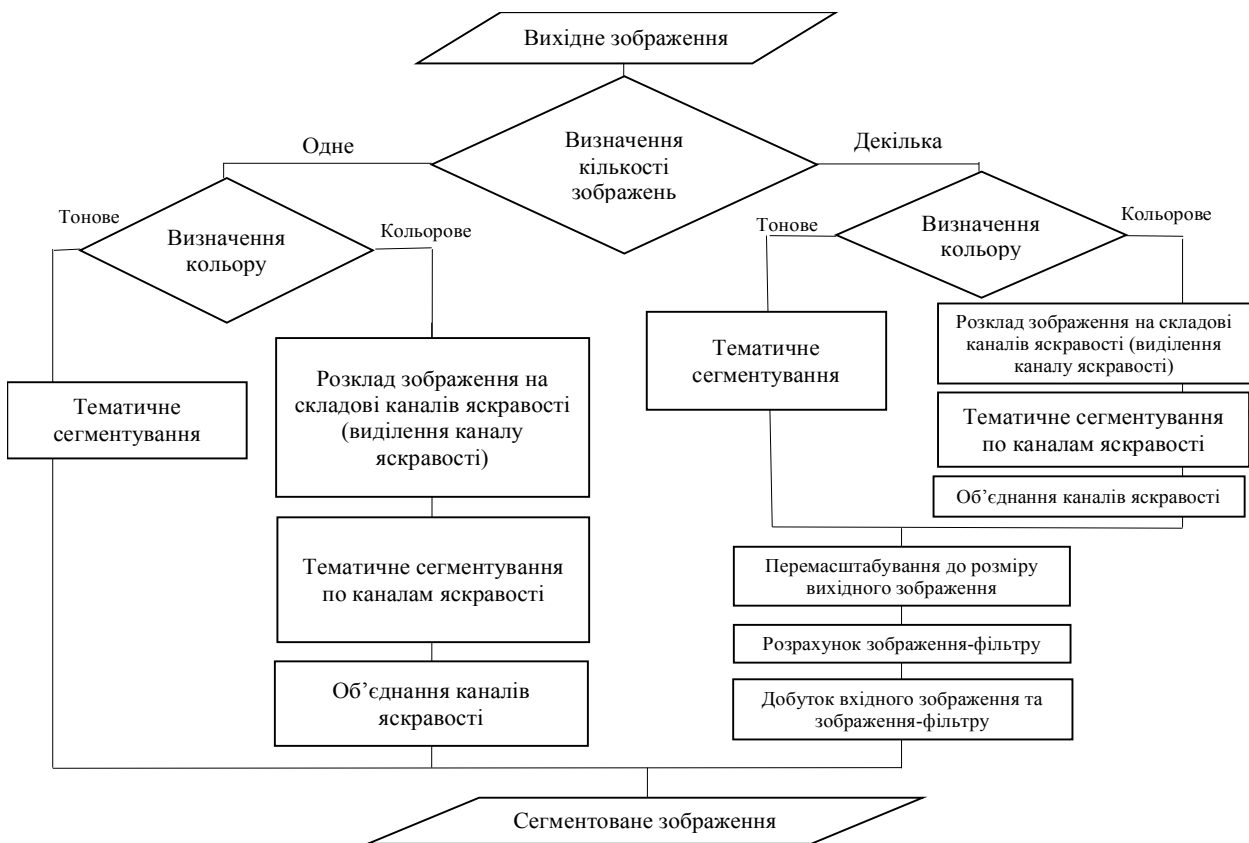


Рис. 4. Інформаційна ройова технологія тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження

В основу інформаційної ройової технології (рис. 4) покладені удосконалені методи ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії) тематичного сегментування оптико-електронного зображення та ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії) тематичного сегментування багатомасштабної по-

слідовності оптико-електронних зображень. На відміну від відомих, інформаційна ройова технологія враховує вихідні дані, а саме – кількість, масштабність вихідних оптико-електронних зображень, колір представлення зображення (тонове чи кольорове), у випадку кольорового зображення – кольоро-

вий простір представлення зображення. У випадку кольорового зображення проводиться розклад зображення на складові каналів яскравості зображення, тематичне сегментування по кожному з каналів яскравості та подальше об'єднання каналів яскравості та отримання сегментованого зображення.

Тематичне сегментування проводиться удосконаленим методом ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії), в якому, на відміну від відомих, враховані особливості формування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, тематичне сегментування зведено до сукупності ділянок руху агентів, визначенню їх швидкості, умови зупинки за критерієм мінімуму цільової функції $D(th)$, яка пропорційна сумі дисперсій яскравості пікселів тематичних сегментів на оптико-електронному зображенні.

При сегментуванні багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень використовується удосконалений метод ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії), в якому, на відміну від відомих, тематичне сегментування зображення кожного масштабу проводиться удосконаленим методом ройового інтелекту (штучної бджолиної колонії), проводиться перемасштабування багатомасштабної послідовності зображень до вихідного розміру, розраховується зображення-фільтр, де яскравість кожного пікселя визначає міру інформативності вихідного зображення та знаходиться шляхом усереднення яскравості відповідних пікселів зображень кожного масштабу, та знаходиться попіксельний добуток вихідного зображення та зображення-фільтр.

Для прикладу наведемо результат тематичного сегментування кольорового зображення, що представлено в кольоровому просторі RGB (рис. 5).



Рис. 5. Вихідне зображення [26]

Оптимальні значення порогів сегментування для всіх каналів яскравості кольорового простору RGB кольорового зображення (рис. 5) наведені на рис. 6.

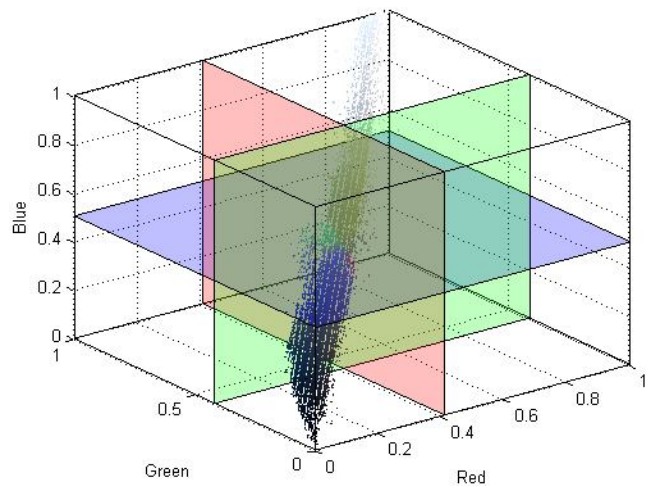


Рис. 6. Оптимальні значення порогу для кожного каналу кольорового простору RGB вихідного зображення (рис. 5)

Результат тематичного сегментування вихідного зображення (рис. 5) з використанням інформаційної ройової технології тематичного сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження, наведено на рис. 7.



Рис. 7. Сегментоване зображення з використанням інформаційної ройової технології тематичного сегментування

Висновки і напрямки подальших досліджень

В роботі проведено аналіз рівнів технології дешифрування оптико-електронного зображення, аналіз основних етапів обробки оптико-електронного зображення та рівнів локалізації об'єктів інтересу на етапі розпізнавання, аналіз основних вимог до тематичних сегментів зображення, аналіз відомих методів та інформаційних технологій сегментування зображень, що отримані з бортових систем спостереження.

Обґрунтовано вибір цільової функції тематичного сегментування та вибір оптимального значення порогу сегментування.

Встановлено, що у якості цільової функції використовується функція, яка визначається як сума дисперсії інтенсивності пікселів в межах кожного тематичного сегменту, а оптимізація полягає у мінімізації цільової функції.

Розроблено інформаційну роїову технологію тематичного сегментування зображень, що отримані з бортової системи оптико-електронного спостереження.

В основу інформаційної роїової технології покладені удосконалені методи роїового інтелекту (штучної бджолоїної колонії) тематичного сегменту-

вання оптико-електронного зображення та роїового інтелекту (штучної бджолоїної колонії) тематичного сегментування багатомасштабної послідовності оптико-електронних зображень. Наведено тестовий приклад тематичного сегментування кольорового зображення.

В подальших дослідженнях необхідно провести оцінку ефективності розробленої інформаційної роїової технології тематичного сегментування оптико-електронних зображень, що отримані з бортових систем спостереження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лаврінчук О.В. Аналіз технології дешифрування космічних знімків / О.В. Лаврінчук, С.В. Гринюк, М.Ю. Ракушев // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони, 2017. – № 3 (30). – С. 45–49.
2. Попов М.О. Шляхи отримання космічної інформації в інтересах національної безпеки та оборони / М.О. Попов // Наука і оборона, 2003. – № 2. С. 38–50.
3. Ковбасюк С.В. Методичні підходи до процесу дешифрування даних дистанційного зондування Землі середньої розрізненості в інтересах національної безпеки й оборони / С.В. Ковбасюк, Д.Л. Федорчук, Г.Д. Носова // Збірник наукових праць ЖВІ ДУТ, 2015. – Вип. 10. – С. 87–94.
4. Олізаренко С.А. Розробка архітектури нечіткої згорточної нейронної мережі для розпізнавання компактних (точкових) об'єктів на цифровому аерофотознімку / С.А. Олізаренко, В.А. Капранов, Р.В. Сафронов // Системи озброєння та військова техніка, 2016. – Вип. 4 (48). – С. 38–41.
5. Тимочко А.И. Метод дешифрування аэроснимков на основе признакового пространства / А.И. Тимочко, С.А. Олізаренко, О.Ю. Лавров // Системи обробки інформації, 2015. – Вип. 1 (126). – С. 84–87.
6. Самойленко О.В. Перспективи розвитку наземних комплексів приймання та цифрової обробки матеріалів повітряної розвідки Збройних Сил України / О.В. Самойленко, С.О. Пономаренко, М.О. Ладик // Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації, 2016. – Вип. № 12 (19). – С. 115–120.
7. Попов М.О. Видова космічна розвідка в локальних військових конфліктах / М.О. Попов, М.В. Топольницький, В.О. Подліпаєв // Наука і оборона, 2015. – № 1. – С. 25–35.
8. Шитова О.В. Комплексное дешифрование изображений аэрофоторазведки цифровыми методами / О.В. Шитова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України, 2014. – №. 1. – С. 78–82.
9. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. Москва: Техносфера, 2005. – 1072 с.
10. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: Учебное пособие / Н.Н. Красильников // Санкт-Петербург: БХВ – Петербург, 2011. – 608 с.
11. Колочкин В.Я. Алгоритмы обработки изображения в системах машинного зрения роботизированных производственных линий / В.Я. Колочкин, К.М. Нгуен, Т.Х. Чан // Нейрокомпьютеры: разработка, применение, 2014. – № 3. – С. 44–51.
12. Wang Y.S. A New Image Threshold Segmentation based on Fuzzy Entropy and Improved Intelligent Optimization Algorithm / Y.S. Wang // Journal of Multimedia, 2014. – Vol. 9. – № 4. – P. 499–505.
13. Farooque M.Y. Latest trends on image segmentation schemes / M.Y.Farooque, M.S.Raean // International journal of advanced research in computer science and software engineering, 2014. – Vol. 4. – № 10. – P. 792–795.
14. Choudhary R. Recent trends and techniques in image enhancement using differential evolution – a survey / R.Choudhary., R.Gupta // International journal of advanced research in computer science and software engineering, 2017. – Vol. 7. – № 4. – P. 106–112.
15. Sarmah S. A grid-density based technique for finding clusters in satellite image / S.Sarmah, D.K.Bhattacharyya // Pattern Recognition Letters, 2012. – Vol. 33. – No. 5. – P. 589–604.
16. Hu X. Automatic segmentation of high-resolution satellite imagery by integrating texture, intensity, and color features / X.Hu, C.V.Tao, B.Prenzel // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2005. – Vol. 71. – No. 12. – P. 1399–1406.
17. Wang A. Segmentation of multispectral high-resolution satellite imagery based on integrated feature distributions / A.Wang, S.Wang, A.Lucieer // International Journal of Remote Sensing, 2010. – Vol. 31. – No. 6. – P. 1471–1483.
18. Wuest B. Region Based Segmentation of Quickbird Imagery Through Fuzzy Integration / B.Wuest, Y.Zhang // Proc. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (IAPRS), 2008. – Vol. 37, part B7. – P. 491–496.
19. Hu Z. A spatially-constrained color–texture model for hierarchical VHR image segmentation / Z.Hu, Z.Wu, Q.Zhang, Q.Fan, J.Xu // Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2013. – Vol. 10. – No. 1. – P. 120–124.
20. Yuan J. Remote sensing image segmentation by combining spectral and texture features / J.Yuan, D.L.Wang, R.Li // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014. – Vol. 52. – No. 1. – P. 16–24.
21. Senturk, S. Unsupervised classification of vineyard parcels using SPOT5 images by utilizing spectral and textural features / S.Senturk, K.Taşdemir, S.Kaya, E.Sertel // Proc. 2nd International Conference on Agro-Geoinformatics. – IEEE, 2013. – P. 61–65.
22. Рубан І.В. Інформаційна технологія сегментування зображень, отриманих з бортових систем оптико-електронного спостереження / І.В. Рубан., В.Г. Худов, В.О. Подліпаєв // Системи озброєння та військова техніка, 2017. – № 2 (50). – С. 110–113.
23. Хижняк І.А. Сегментування зображення, що отримано з бортової системи оптико-електронного спостереження, роїовим методом / І.А. Хижняк // Системи озброєння та військова техніка, 2017. – № 2 (50). – С. 140–143.

24. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 9. – С. 77-80.
25. Метод ройового інтелекту (штучної бджолоїної колонії (ABC)) тематичного сегментування оптико-електронного зображення / І.А. Хижняк, О.М. Маковейчук, Р.Г. Худов, В.О. Подліпаєв, Г.В. Горбань, Г.В. Худов // Системи управління, навігації та зв'язку, 2018. – Вип. 2 (48). – С. 91–96.
26. IKONOS Satellite Image Gallery (Archived) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до зображень сайту: <http://www.satimagingcorp.com/gallery/ikonos>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К. С. Васюта,
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків
Received (Надійшла) 19.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

Информационная роевая технология тематической сегментации изображений, полученных с бортовых систем оптико-электронного наблюдения

И. А. Хижняк, А. Н. Маковейчук, Г. В. Худов

Предметом изучения в статье является информационная роевая технология тематической сегментации изображений, полученных с бортовых систем оптико-электронного наблюдения. **Целью** является разработка информационной технологии сегментации, в основу которой положены роевые методы тематической сегментации оптико-электронного изображения. **Задачи:** анализ уровней технологии дешифрирования оптико-электронного изображения, анализ основных этапов обработки оптико-электронного изображения и уровней локализации объектов интереса на этапе распознавания, анализ основных требований к тематическим сегментам изображения, анализ известных методов и информационных технологий сегментации изображений, полученных с бортовых систем наблюдения, обоснование целевой функции тематической сегментации и выбора оптимального порога сегментации, разработка информационной роевой технологии тематической сегментации изображений, полученных с бортовой системы оптико-электронного наблюдения, демонстрация тестового примера тематической сегментации цветного изображения. Используемыми **методами** являются: методы теории вероятности, математической статистики, роевого интеллекта, кластеризации данных, эволюционных вычислений, методы оптимизации, математического моделирования и цифровой обработки изображений. Получены следующие **результаты**. Установлено, что основным этапом обработки изображений, полученных с бортовых систем наблюдения, является этап тематической сегментации. Установлено, что в настоящее время небольшое количество исследований посвящено решению задачи тематической сегментации изображений, полученных с бортовых систем наблюдения. Установлено, что в качестве целевой функции используется функция, которая определяется как сумма дисперсий интенсивности пикселей в пределах каждого тематического сегмента, а оптимизация заключается в минимизации целевой функции. В основу информационной технологии заложены усовершенствованные методы роевого интеллекта (искусственной пчелиной колонии) тематической сегментации оптико-электронного изображения и роевого интеллекта (искусственной пчелиной колонии) тематической сегментации многомасштабной последовательности оптико-электронных изображений. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: повышение визуального качества сегментированного изображения, что в дальнейшем существенно влияет на решение задачи дешифрирования изображения.

Ключевые слова: бортовая система наблюдения, оптико-электронное изображение, тематическая сегментация, информационная технология, роевые методы, искусственная пчелиная колония, целевая функция, порог сегментации, оптимизация, многомасштабная последовательность.

Informational swarm technology of the thematic images segmentation obtained from on-board systems of optical-electronic observation

I. Khizhnyak, A. Makoveychuk, H. Khudov

The **subject matter** of the article is information swarm technology for thematic images segmentation obtained from on-board optical-electronic surveillance systems. The **goal** is to develop of information technology segmentation, which is based on the swarm methods of the thematic optical-electronic image segmentation. The **tasks** to analysis of the levels of optical-electronic image interpretation technology, analysis of the main processing steps of the optical-electronic image and the levels of localization of objects of interest at the recognition stage, analysis of the basic requirements for thematic image segments, analysis of known methods and information technology for segmentation of images obtained from airborne surveillance systems, justification of the fitness function of thematic segmentation and the selection of the optimal segmentation threshold, development of information swarm technologies segmentation obtained from onboard system of optical-electronic observation, demonstration test example thematic color image segmentation. The **methods** used are: methods of probability theory, mathematical statistics, swarm intelligence, data clustering, evolutionary calculations, optimization methods, mathematical modeling and digital image processing. The following **results** were obtained. It is established that the main stage of image processing obtained from airborne surveillance systems is the stage of thematic segmentation. It is established that at present a small number of studies are devoted to solving the problem of thematic segmentation of images obtained from airborne surveillance systems. It is established that the objective function is a function that is defined as the sum of the pixel intensity dispersions within each thematic segment, and optimization consists in minimizing the objective function. The basis of information technology is based on improved methods of swarm intelligence (an artificial bee colony) for thematic segmentation of the optical-electronic image and swarm intelligence (an artificial bee colony) of thematic segmentation of a multiscale sequence of optical-electronic images. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows: an increase in the visual quality of the segmented image, which subsequently significantly affects the solution of the problem of image decoding.

Keywords: onboard surveillance system, optical-electronic image, thematic segmentation, information technology, swarm methods, artificial bee colony, fitness function, segmentation threshold, optimization, multiscale sequence.

О. В. Яровий

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЛОТНИМИ ЛІТАЛЬНИМИ АПАРАТАМИ ДЛЯ ЗДІЙСНЕННЯ МОНІТОРИНГУ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

Метою статті є проведення аналізу існуючих БПЛА (дронів, мультикоптерів, квадрокоптерів, гексакоптерів) різних класів і типів з метою вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів. **Результати.** Проведено аналіз різних класів і типів існуючих безпілотних літальних апаратів. Розглянуто ряд переваг безпілотних літальних апаратів перед пілотованими. Наведено варіант використання безпілотного літального апарату для передачі даних між наземним центром управління та базовим блоком системи моніторингу. Розглянуто структуру компоновки безпілотного літального апарату з роботизованим пристроєм. Надано рекомендації щодо вибору оптимальних моделей безпілотних літальних апаратів та систем управління для виконання задач моніторингу наземних об'єктів. **Висновки.** Проведений в статті аналіз різних класів і типів існуючих БПЛА, а також ряд переваг безпілотних літальних апаратів перед пілотованими, дає можливість надати рекомендації щодо вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління для виконання задач моніторингу наземних об'єктів. Варіант використання БПЛА для передачі даних між наземним центром управління та базовим блоком системи моніторингу, а також структура компоновки БПЛА з роботизованим пристроєм, які наведені в статті, пропонується також вважати базовими при виборі оптимальних моделей БПЛА.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, мультикоптер, система управління, бортовий контролер, радіоканал, роботизований пристрій.

Вступ

На сьогодні більшість існуючих безпілотних літальних апаратів (БПЛА) пілотуються вручну, за допомогою пультів дистанційного керування, що працюють на радіоканалах. При ручному управлінні БПЛА виникають труднощі, пов'язані зі спеціальною підготовкою операторів, що будуть ними керувати, недостатньою робочою дальністю БПЛА, обмеженнями, пов'язаними з погодними умовами тощо. Управління БПЛА є завданням для підготовленого професіонала. Наприклад, в армії США операторами БПЛА стають діючі пілоти військово-повітряних сил (ВПС) після річної підготовки та тренінгу. У багатьох аспектах це іноді є складнішим, ніж пілотування літаком. Більшість аварій БПЛА виникають через помилки операторів і механічних відмов. За офіційними даними на 2017 рік у ВПС США за весь час були розбиті 120 безпілотників [1].

Постановка проблеми

Новим технічним напрямком у світі є побудова мультикоптерів – БПЛА з парною кількістю роторів, що обертаються діагонально в протилежних напрямках. У разі, коли двигунів чотири, такий БПЛА називається квадрокоптер. Сам по собі БПЛА є лише частиною складного багатофункціонального комплексу. На відміну від пілотованої авіації для БПЛА потрібні додаткові елементи системи забезпечення. До них відносяться сам безпілотний апарат, робоче місце оператора, програмне забезпечення, лінії передачі даних і елементи, необхідні для виконання цілей польоту. На сьогодні головним трендом є створення невеликого безпілотного квадрокоптера. Основними причинами такого стану речей є можливість простого управління, надійність і маневреність. Квадрокоптери мають великий попит серед авіамоделістів, а також знаходять своє застосування і в професійній сфері, наприклад в цивіль-

ному секторі, сільському господарстві, армії, поліції та інших силових структурах. В цьому сенсі постає питання щодо вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління з метою здійснення моніторингу наземних об'єктів.

Метою статті є проведення аналізу існуючих БПЛА (дронів, мультикоптерів, квадрокоптерів, гексакоптерів) різних класів і типів з метою вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів.

Виклад основного матеріалу

Спектр застосування безпілотних літальних апаратів в цивільному секторі не обмежений, але при нинішньому стані правової бази щодо використання повітряного простору виконання польотів ускладнено. В інтересах народного господарства БПЛА можуть застосовуватися в таких областях:

- ведення пошукових робіт;
- виконання геологічної розвідки;
- аерозйомка місцевості;
- виконання авіаційних хімічних робіт;
- моніторинг територій і об'єктів;
- ведення відеоспостереження.

Безпілотні літальні апарати мають ряд переваг перед пілотованими, а саме:

- для виконання одних і тих же завдань, легкі безпілотні апарати обходяться набагато дешевше пілотованих літаків, які потрібно оснащувати системами життєзабезпечення, захисту, кондиціонування тощо;

- треба готувати пілотів, а це коштує великих грошей і значного часу. У підсумку виходить, що відсутність екіпажу на борту істотно знижує витрати на виконання того чи іншого завдання, а також підвищується корисне навантаження апарату;

- на відміну від пілотованих літаків, машинам без пілота не потрібні аеродроми;

- важливою перевагою при використанні систем автоматичного і напівавтоматичного управління можна вважати виключення людського фактору при виконанні поставленого завдання.

Для забезпечення завдань спостереження за поверхнею Землі в реальному масштабі часу в процесі польоту і цифрового фотографування обраних ділянок місцевості, включаючи важкодоступні ділянки, а також визначення координат досліджуваних ділянок місцевості БПЛА повинен містити в своєму складі:

- супутникову навігаційну систему (GPS);
- пристрої командно-навігаційної радіолінії з антенно-фідерним пристроєм;
- пристрій обміну командною інформацією;
- бортову цифрову обчислювальну машину.

Залежно від класу БПЛА корисне навантаження може доповнюватися різними видами радіолокаційних станцій (РЛС), датчиками екологічного, радіаційного та хімічного моніторингу. Комплекс управління БПЛА є складною системою, яка має багаторівневу структуру і основне завдання якої є забезпечення виведення БПЛА у заданий район і виконання операцій відповідно до польотного завдання, а також забезпечення доставки інформації, отриманої бортовими засобами БПЛА, на пункт управління.

Розглянемо БПЛА, контроль і управління якого здійснюється на базі контролера Ardupilot mega 2560, створеного для застосування в автономних літальних апаратах, автомобілях або судах [2-5]. Бортовий комплекс «Ardupilot» є повнофункціональним засобом навігації, контролю і управління безпілотного літального апарату літакової схеми.

Комплекс забезпечує визначення навігаційних параметрів, кутів орієнтації і параметрів руху БПЛА (кутових швидкостей і прискорень), навігацію і управління БПЛА при польоті по заданій траєкторії; стабілізацію кутів орієнтації БПЛА в польоті, видачу в канал передачі телеметричної інформації про навігаційні параметри та кути орієнтації БПЛА.

Центральним елементом бортового комплексу «Ardupilot» є малогабаритна інерціальна навігаційна система (ІНС), інтегрована з приймачем супутникової системи навігації. Побудована на базі мікроелектромеханічних датчиків (гіроскопів і акселерометрів) за принципом ІНС, система є унікальним високотехнологічним виробом. Вбудований датчик статичного тиску забезпечує динамічне визначення висоти і швидкості. Типовий варіант бортового контролера для мультикоптера наведено на рис. 1.

Склад бортового комплексу:

- блок інерціальної навігаційної системи;
- приймач супутникової навігаційної системи (СНС);
- блок автопілота;
- накопичувач льотних даних;
- датчик повітряної швидкості.

Комплекс сумісний з радіоканалом імпульсно-кодів модуляції (ІКМ) і дозволяє управляти БПЛА як в ручному режимі зі стандартного пульта дистанційного керування, так і в автоматичному по командам автопілота.



Рис. 1. Бортовий контролер для мультикоптера

Автопілот здатний одночасно стабілізувати політ і управляти навігацією, що усуває необхідність в окремій системі стабілізації. Автопілот підтримує режим "дистанційно керованого польоту" ("fly-by-wire"). Плата розроблена на базі 16 МГц мікроконтролера Atmega. Зв'язок з контролером здійснюється за допомогою аналогового приймача «HITEC RCD 9500». «Ardupilot» обраний через можливість вільно коригувати код і вносити зміни в алгоритм. Також однією з причин його обрання є доступність на ринку. Забезпечення автоматичного зльоту і посадки це зручний спосіб упорядкування. Є також повна підтримка симуляторів Xplane [6] і Flight Gear [7].

Міжнародною асоціацією по безпілотним системам AUVSI (Association for Unmanned Vehicle Systems International) була запропонована універсальна класифікація БПЛА, яка об'єднує багато критеріїв.

Для здійснення моніторингу наземних об'єктів найбільше підходять мультикоптери, які мають високу маневреність та керованість, просту конструкцію і можуть виконувати багато різних функцій, потребують досить простих навичок керування при відносно невисокій вартості.

На рис. 2 - 6 показані різні варіанти конструкцій квадрокоптерів із підвіскою для відеокамер. На рис. 7 демонструється схема мультикоптера з шістьма гвинтами – гексакоптер. Максимальна кількість несучих гвинтів принципово не обмежується, але в реалії обмежується вісьма силовими двигунами з міркування оптимального використання живлення бортовими пристроями та гвинтомоторною групою [8].



Рис. 2. Приклад серійної моделі квадрокоптера для цивільних задач моніторингу



Рис. 3. Приклад квадрокоптера із зовнішньою підвіскою з курсовою камерою



Рис. 4. Приклад конструкції БПЛА рамкового типу



Рис. 5. Приклад мініквадрокоптера без відеокамери і підвіски



Рис. 6. Квадрокоптер Inspire 1 V2.0 з відеокамерою на керованій платформі



Рис. 7. Приклад гексакоптера класу «міні» із зовнішньою підвіскою вантажем

Чим більше двигунів – тим більше живлення потребує апарат і тим більша повинна бути ємність батарей. Але чим більше двигунів, тим більше вантажопід'ємність апарату та менше польотний час і тим меншу дальність може подолати безпілотник. В той же час, чим більше обертів двигунів в одиницю часу, тим більше вантажопід'ємність і тим вище може піднятися БПЛА. В протилежність останнього, чим більше двигунів, тим складніше керування апаратом, збільшуються його габарити, а як наслідок збільшується «парусність». Пориви вітру на висоті можуть частіше перевертати літальний апарат, «здувати» його з курсу і для підтримки заданого напрямку польоту буде витрачатися більше живлення.

Для мультикоптерів важливою характеристикою є кількість гвинтів. Вважалося, що кількість гвинтів впливає на стабільність польоту. Так коптери з 8-ю гвинтами літали набагато стабільніше 4-х і 6-ти гвинтових, але на сьогоднішній день, завдяки розвитку алгоритмів польоту, всі коптери літають однаково стабільно, навіть в разі відмови одного з гвинтів. Більшість моделей БПЛА використовують електродвигуни. Характеристики двигуна відповідають за максимальну дальність і час польоту. Електродвигуни живляться від акумуляторних батарей різного типу і залежать від розмірів БПЛА. Компактні моделі можуть провести в повітрі 40 хвилин, а великі моделі до 4 годин, долаючи відстань до 300 км.

Максимальна і крейсерська швидкість впливають на можливість використання БПЛА в вітряну погоду і на продуктивність зйомки. Середня крейсерська швидкість невеликих моделей становить близько 50 - 60 км/год., швидкість більших моделей становить близько 100 км/год. Обмеження використання БПЛА за швидкістю вітру при старті і посадці в середньому складають близько 10 м/с.

Для зв'язку з БПЛА під час польоту використовуються радіоканали. Частоти таких каналів варіюють від 433 МГц до 2,4 ГГц. Іноді за допомогою радіоканалу передають відео та фотоматеріали, отримані під час зйомки. Розмір і кількість антен, їх конструкція впливають на аеродинаміку, в першу чергу для Платформи тактичної підтримки (ПТП).

Основним критерієм вибору схеми БПЛА і ПТП повинні бути перелік їх функцій і завдань, що вони повинні виконувати, дальність і висота польотів, а також вимоги до вантажопід'ємності корисного вантажу та можливого бортового обладнання.

На БПЛА може встановлюватися платформи з відео обладнанням і роботизованій пристрій для виконання наземних операцій із обраними об'єктами сервісного маніпулювання. В останньому варіанті використовується робот-маніпулятор, який може захопити об'єкт і перемістити його завдяки квадрокоптеру в задану точну простору або на базу управління, може заміряти його вагу, габарити, температуру, інші фізико-хімічні показники чи визначити радіологічні характеристики навколишнього середовища [8].

Крім фотокамер на борт БПЛА можуть бути встановлені інші прилади, такі наприклад як тепловізор, лазерний сканер, відеокамера. Використовуючи ці прилади є можливість вирішувати виробничі

завдання, пов'язані з моніторингом та технічним діагностуванням об'єктів.

Критерії вибору можна визначити також виходячи з виду робіт щодо моніторингу заявлених об'єктів. Якщо розглядаються моделі для високоточних вимірювань, то відеоматеріал повинен відповідати чинній нормативній документації для фотографічних, геодезичних та землевпорядних робіт.

Після виготовлення робочого зразка роботизованого пристрою, вага якого не повинна перевищувати 800 г, оснащення БПЛА курсовою камерою та камерою наземного моніторингу, підбору для них підвісок, визначення з батареями живлення, антенними блоками, які використовуються для передачі відеопотоків і потоків даних та телеметрії на НЦУ, вибору реальних двигунів, можна буде конкретизувати всі параметри базового блоку.

При таких обумовлених даних можемо обрати схему квадрокоптера, яка задовольняє означені вимоги при заданих обмеженнях для БПЛА.

Блок ПТП повинен відповідати меншій кількості критеріїв – максимальний польотний час, стабільність висоти «баражування», можливість ретрансляції потоків управління на БПЛА з НЦУ та ретрансляції відео і телеметрії у зворотному напрямку, включаючи загоризонтний варіант. У цьому випадку можна зазначити, що оптимальним варіантом для реалізації ПТП є квадрокоптер вагою 1-2 кг, швидкістю польоту 50-60 км/год., максимально досяжною висотою польоту 4-5 км, з підняттям корисної ваги до 2-2,5 кг.

Для ПТП важливим є також аеродинамічні характеристики, які можуть впливати на польотну стійкість і, відповідно на стабільність ретрансляції потоків даних та відео між БПЛА і НЦУ.

Для створення безпілотних мобільних засобів моніторингу наземних об'єктів і загоризонтного керування, що включають роботизовані пристрої з інтелектуальними компонентами, необхідно розробити:

- нові методи оптимізації польотних маршрутів з урахуванням результатів комп'ютерного моделювання на емуляторі режимів пілотування, тестових параметрів базового модуля та його наявної компоновки;
- нові методи аеромобільного збору моніторингових даних з вибором оптимального методу, з точки зору комплексної ефективності виконання моніторингового завдання, з метою зменшення впливу різноманітних дестабілізуючих впливів і зовнішніх факторів;
- нові способи і засоби загоризонтного керування БПЛА з використанням функціонально спеціалізованої ПТП, включаючи можливість віддаленої корекції чи зміни польотного завдання з пункту наземного керування безпосередньо під час польоту БПЛА;
- нові компоненти системи аеромоніторингу на основі серійного БПЛА чи квадрокоптера і наземної підсистеми збору, обробки та накопичення моніторингової інформації та проведенні випробування системи;
- нові алгоритми та програмні продукти по загоризонтному пілотуванню, по первинній обробці моніторингових даних, по накопиченню, індексації та збереженню даних;
- методичні рекомендації по проведенню випробувань та ефективному використанню систем моні-

торингу наземних об'єктів на основі безпілотних аеромобільних засобів з використанням ПТП.

Для управління у випадку відсутності прямого зв'язку між БПЛА і НЦУ, або входу в зону нестійкого зв'язку, виникає необхідність у використанні високої мачти антени НЦУ або використання супутникових каналів зв'язку. Потрібен додатковий аналіз ефективності наземних антен в залежності від їх конструкції, висоти підйому та діапазону частот.

Треба зазначити, що доступні канали супутникових хабів, як правило, малошвидкісні і дорогі.

Можливо вирішення також задачі управління роботизованим пристроєм, коли об'єкт сервісної роботи знаходиться, наприклад, за будівлею, яка екранує радіопромінь, чи на дні впадини, коли можуть бути відлуння радіопромінів керування.

Спрямувавши ПТП в іншу зону його баражування, можна відновити стійкий зв'язок між НЦУ та БПЛА і виконати заявлені програмні завдання.

Таку схему загоризонтного управління можна використовувати для оптимізації зони вильоту БПЛА за межі зони стійкого зв'язку з ПТП, якщо перебазувати ПТП по мірі віддалення БПЛА в нову зону баражування, чим можна значно збільшити дальність польоту БПЛА і розширити зону його застосування в задачах моніторингу наземних об'єктів і для виконання роботом відповідних сервісних робіт.

Розробка компоновки БПЛА з роботизованим пристроєм полягає у наступному:

По-перше, БПЛА з роботизованим пристроєм має традиційні блоки та системи, якими оснащуються такі пристрої: 3-х осевий гіроскоп, 3-х осевий акселерометр та барометричний висотомір, які через АЦП надають сигнали про режим польоту до головного процесора обробки даних та управління, до якого через блок комутації також поступають сигнали з GPS приймача, магнітометра та радіомодема. Останній через антену отримує з НЦУ команди управління оператора на частоті 2,4 ГГц.

По-друге, для усунення можливості зіткнення квадрокоптера з Землею, до блока комутації підключено ультразвуковий висотомір.

Головний процесор здійснює інтеграцію отриманих сигналів та управляє регуляторами обертів двигунів, керуючи польотом БПЛА. Він отримує дані безпосередньо від процесора управління роботом. Крім того, головний процесор і процесор управління роботом взаємодіють для забезпечення автономної роботи роботизованого пристрою, коли неможливе дистанційне керування роботом.

Блок телеметрії формує потік телеметричних даних щодо параметрів і режимів роботи БПЛА та роботизованого пристрою. Цей блок передає потік даних через передавач телеметрії і антенну систему телеметрії. Телеметрична інформація не потребує широкого каналу зв'язку, тому можна використовувати в якості каналів передачі даних відносно низькочастотні канали. Через антенну систему з широко-частотною полосою потоки змішаних даних та відео з курсової камери, а також потік з відеокamera моніторингу наземних об'єктів, передаються з високою швидкістю на НЦУ. Відеодані з обох камер прохо-

дять попередню обробку зображень і форматування у відеопроцесорах.

Для управління роботою відеокамер БПЛА для кожної камери використовуються своя система керування, які управляються командами, що формуються в головному процесорі на основі команд оператора та оперативних даних про наземні об'єкти моніторингу [8]. БПЛА також комплектується одним чи двома акумуляторами для живлення описаних пристроїв та роботизованого пристрою. В комплекті може бути також радіомаяк для полегшення розшуку БПЛА при аварійних посадках та, нештатних ситуаціях з роботизованим пристроєм.

На рис. 8 показано основні компоненти БПЛА, а також структуру компонентів роботизованого пристрою, яка складається з процесора управління ро-

ботом, систем управління маніпулятором і управління безпосередньо виконавчим органом, а також системою агрегації сигналів з сенсорів. У разі необхідності базовий блок оснащується тепловізором та відповідним контролером для обробки його даних.

Процесор управління роботом отримує сигнали від сенсорної системи робота і формує, відповідно до закладених в нього алгоритмів, команди управління для сервоприводів маніпулятора та системи управління виконуючим пристроєм робота. У випадку реалізації автономного режиму роботи робота використовуються типові програми керування роботом, які зберігаються в спеціальній кеш-пам'яті процесора управління роботизованого пристрою і завантажуються в цей процесор на період дії автономного режиму роботи.

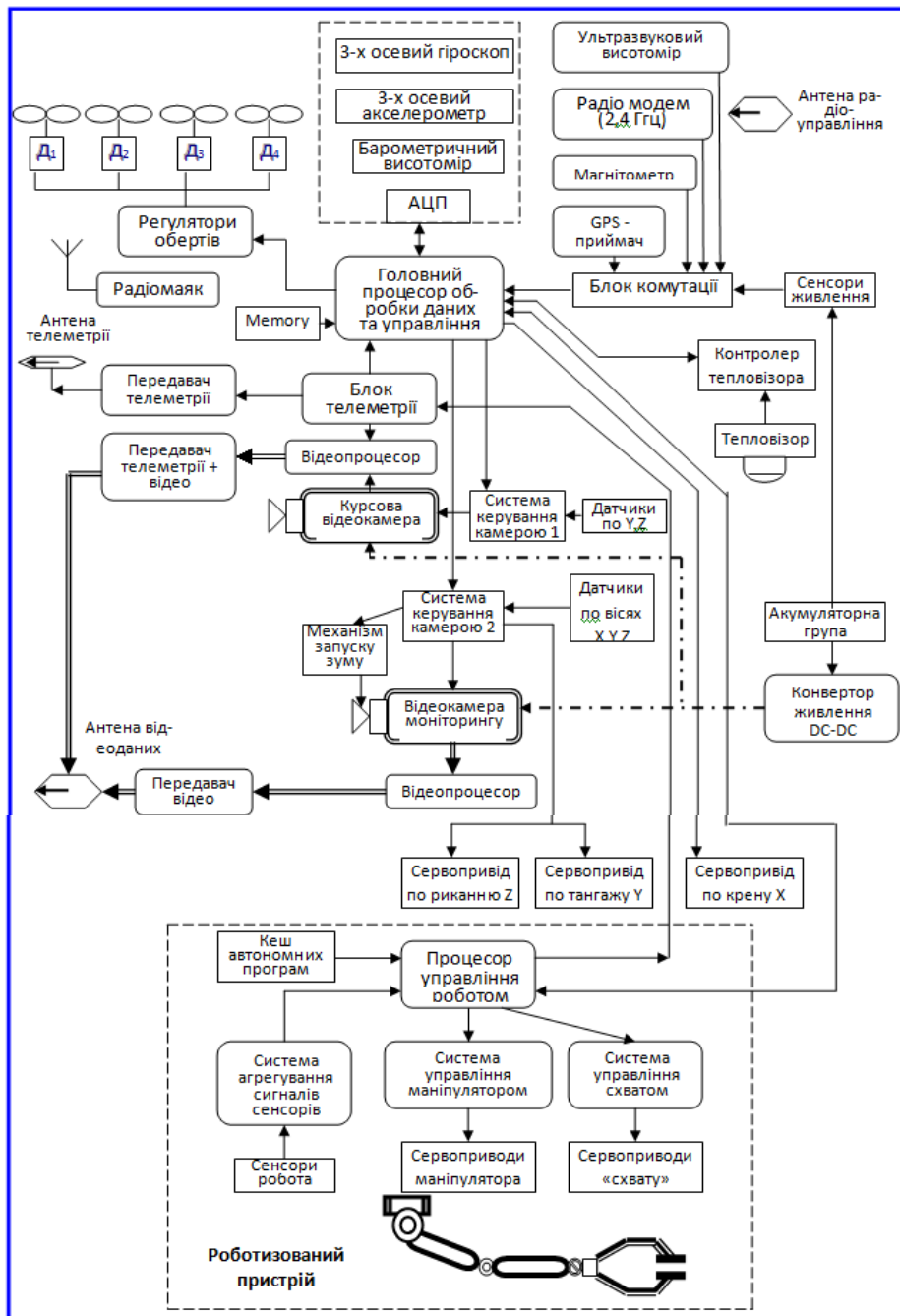


Рис. 8. Структура компоновки БПЛА

В такому режимі роботи обмін даними між головним процесором обробки даних і управління БПЛА та процесором управління роботом не перебивається, а навпаки, збільшується в сторону інтенсивності взаємодії.

ВИСНОВКИ

Проведений в статті аналіз різних класів і типів існуючих БПЛА, а також ряд переваг безпілотних літальних апаратів перед пілотованими, дає

можливість надати рекомендації щодо вибору оптимальних моделей БПЛА та систем управління для виконання задач щодо моніторингу наземних об'єктів.

Варіант використання БПЛА для передачі даних між наземним центром управління та базовим блоком системи моніторингу, а також структура компоновки БПЛА з роботизованим пристроєм, які наведені в статті, пропонується також вважати базовими при виборі оптимальних моделей БПЛА.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Класифікація UVS International [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://helpiks.org/6-70010.html>.
2. Büchi R. Faszination Quadrocopter. 1. Auflage. Verlag für Technik und Handwerk / R. Büchi. – Verlag f.Technik / Handwerk, 2010. – 72 p. – ISBN 978-3-88180-791-3.
3. Riegler T. Quadrocopter richtig einstellen und fliegen / T. Riegler. – Franzis, Poing 2011. – ISBN 978-3-645-65073-1.
4. Rattat C. Multicopter selber bauen: Grundlagen – Technik – eigene Modelle / C. Rattat. –Verl., Heidelberg, 2015. – ISBN 978-3-86490-247-5.
5. DronePort [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://droneport.com.ua>.
6. Haas E. Aeronautical channel modeling / E. Haas // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2012. – V. 51. – № 2. – P. 254-264.
7. Richard V.N. OFDM wireless multimedia communication / V.N. Richard, R. Prasad // Artech House Boston London. – 2010. – P. 260.
8. Зинченко О.Н. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэрофотосъемки для картографирования [Електронний ресурс] / О.Н. Зинченко. – Режим доступу: <http://www.racurs.ru/?page=681>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф., академік НАН України Ю. І. Якименко, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

Received (Надійшло) 2.04.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.05.2018

Системы управления беспилотными летательными аппаратами для осуществления мониторинга наземных объектов

А. В. Яровой

Целью статьи является проведение анализа существующих БПЛА (дронов, мультикоптеров, квадрокоптеров, гексакоптеров) различных классов и типов с целью выбора оптимальных моделей БПЛА и систем управления для выполнения задач по мониторингу наземных объектов. **Результаты.** Проведен анализ различных классов и типов существующих беспилотных летательных аппаратов. Рассмотрен ряд преимуществ беспилотных летательных аппаратов перед пилотируемыми. Приведен вариант использования беспилотного летательного аппарата для передачи данных между наземным центром управления и базовым блоком системы мониторинга. Рассмотрена структура компоновки беспилотного летательного аппарата с роботизированным устройством. Даны рекомендации по выбору оптимальных моделей беспилотных летательных аппаратов и систем управления для выполнения задач по мониторингу наземных объектов. **Выводы.** Проведенный в статье анализ различных классов и типов существующих БПЛА, а также ряд преимуществ беспилотных летательных аппаратов перед пилотируемыми, дает возможность предоставить рекомендации по выбору оптимальных моделей БПЛА и систем управления для выполнения задач по мониторингу наземных объектов. Вариант использования БПЛА для передачи данных между наземным центром управления и базовым блоком системы мониторинга, а также структура компоновки БПЛА с роботизированным устройством, приведенные в статье, предлагается также считать базовыми при выборе оптимальных моделей БПЛА.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, мультикоптер, система управления, бортовой контроллер, радиоканал, роботизированное устройство.

Systems of management of unavailable flighting apparatus for implementation of monitoring of ground objects

O. Yarovy

The purpose of the article is to conduct an analysis of existing UAVs (drones, multicopters, quadcopters, hexa-copters) of different classes and types in order to select the best models of UAVs and control systems for the fulfillment of land monitoring tasks. **Results.** The analysis of various classes and types of existing unmanned aerial vehicles is carried out. A number of advantages of unmanned aerial vehicles in front of manned aircraft are considered. A version of the use of an unmanned aerial vehicle for data transmission between the ground control center and the base unit of the monitoring system is given. The structure of the layout of an unmanned aerial vehicle with a robotic device is considered. Recommendations are given on the selection of optimal models of unmanned aerial vehicles and control systems for performing tasks to monitor land-based facilities. **Conclusions.** The analysis of different classes and types of existing UAVs in the article, as well as the number of advantages of unmanned aerial vehicles before the pilots, provides an opportunity to provide recommendations on the selection of optimal UAV models and control systems for the fulfillment of tasks for monitoring of ground objects. The option of using UAVs for data transmission between the ground control center and the base unit of the monitoring system, as well as the layout structure of the UAVs with the robotic device, are given in the article, and it is also proposed to be considered basic when choosing the best models of the UAV.

Keywords: unmanned aerial vehicle, multicopter, control system, on-board controller, radio channel, robotic device.

ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИЙ ОПИС КОГЕРЕНТНОГО ЗОБРАЖЕННЯ ПОВЕРХНІ В ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ТА РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Проаналізовані основні засади скалярної теорії дифракції та фундаментальні теореми розрахунку поля в будь-якій точці об'єму за даними значень поля на його поверхні. З аналізу випливає, що в загальному випадку когерентним зображенням поверхні можна вважати просторово-розподілені граничні умови, задані у вигляді неперервних функцій просторових координат поля на поверхні з неперервними першими та другими похідними. Конкретизація цих умов для реальних земних покривів значно ускладнює вирішення дифракційних задач, тому запропоновано використовувати феноменологічний опис полів в області їх реєстрації. Наведені приклади феноменологічного визначення поля в зоні Френеля та Фраунгофера при вирішенні задач дистанційного зондування. Показаний процес відновлення когерентних зображень за допомогою зворотних перетворень та проаналізована їх роздільна здатність.

Ключові слова основи теорії дифракції, когерентне зображення, феноменологічний опис, роздільна здатність, зона Френеля, зона Фраунгофера.

Вступ

При вирішенні задач оптимального відновлення когерентних оптичних та радіолокаційних зображень поверхонь [1], підповерхневих ґрунтів [2], атмосферних неоднорідностей [3] та інших природних середовищ [4] виникає проблема детермінованого визначення структури розсіяних електромагнітних полів в області їх реєстрації. Існує декілька підходів до вирішення цієї проблеми, що ґрунтуються на теоремі Кірхгофа, Релея-Зоммерфельда, формулах Стреттона-Чу та інших фундаментальних основах теорії дифракції. Однак навіть у найпростіших випадках застосування скалярної формули Кірхгофа, розрахунки поля, що віддзеркалені від дрібношорстких або двомасштабних поверхонь, досить складні, а їх результати громіздкі і не завжди однозначні. Практично неможливо виконати точні електродинамічні розрахунки для реальних земних покривів (лісів, трав'яних покривів, сільськогосподарських угідь). У зв'язку з цим пропонується використати феноменологічний підхід для опису розсіяних електромагнітних полів та обґрунтування поняття когерентного зображення. Результати таких досліджень дозволять коректно поставити і вирішити задачу оптимальної обробки сигналів в системах формування когерентних і некогерентних зображень поверхонь, а також виконати достовірне моделювання процесів формування зображень.

1. Опис когерентного зображення поверхні згідно теорії дифракції

Для опису когерентного зображення поверхні розглянемо основні положення скалярної теорії дифракції, принцип Гюйгенса-Френеля та його розвиток у теоремах Кірхгофа та Релея-Зоммерфельда.

В 1678 р. Христіан Гюйгенс запропонував розглядати кожен точку хвильового фронту світла у ви-

гляді вторинного джерела сферичних хвиль, а новий хвильовий фронт в наступні моменти часу як огинаючу сферичних хвиль, що створені значною кількістю вторинних джерел, які розміщені на попередньому фронті. Огюстен Жан Френель доповнив (в 1818 р.) ці твердження припущенням, що хвилі вторинних джерел при розповсюдженні когерентно складаються, тобто інтерферують згідно теорії Юнга. Поєднанням тверджень Гюйгенса і Френеля отримало назву принципу Гюйгенса-Френеля [5, 6]. У 1882 році Густав Кірхгоф математично формалізував цей принцип у вигляді інтегральної теореми Кірхгофа

$$\int_V (\varphi \nabla^2 E - E \nabla^2 \varphi) dV = \int_D \left(\varphi \frac{\partial E}{\partial \bar{n}} - E \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{n}} \right) dD, \quad (1)$$

де φ та E – будь-які неперервні комплексні функції просторових координат, що мають неперервні перші дві частинні похідні у середині об'єму V та на замкненій поверхні D , яка охоплює цей об'єм, ∇ – оператор Гамільтона, ∇^2 – оператор Лапласа, \bar{n} – зовнішня нормаль до поверхні D . Перетворення (1) можна отримати безпосередньо з теореми Гауса-Остроградського [7].

Теорема Кірхгофа (1) стала основою скалярної теорії дифракції хвиль. Подібне рішення для монохроматичних хвиль в акустиці було отримано раніше Германом фон Гельмгольцем. Тому для монохроматичних хвиль відповідна теорема названа теоремою Кірхгофа-Гельмгольца.

Коректність застосування теореми (1) в теорії дифракції залежить від вибору однієї з функцій φ або E . Обрану функцію, наприклад функцію φ , називають функцією Гріна. Її обирають з певних фізичних міркувань і здорового глузду. У загальному випадку її вибір становить проблему і вимагає аналізу кожної конкретної задачі.

Найчастіше при дослідженні дифракції монохроматичних хвиль у якості такої функції вибирають математичний вираз, що описує сферичну хвилю

$$\varphi(R) = \frac{\exp(\pm jkR)}{R}, \quad R = |\vec{r} - \vec{r}'|, \quad (2)$$

де $\vec{r} = (x, y, z)$, $\vec{r}' = (x', y', z')$ – відповідні координати двох різних точок усередині об'єму V , k – хвильове число. Різні точки поверхні D характеризуються координатами $\vec{r}_D = (x_D, y_D, z_D)$, а відстані до них від точки \vec{r}' дорівнюють $R_D = |\vec{r}_D - \vec{r}'|$. Фізичний зміст функції Гріна – це реакція, яка проявляється у вигляді вторинного випромінювання сферичної хвилі під впливом поля на точковий елемент, який математично можна описати просторовою дельта-функцією.

Похідна функції Гріна (2) має вигляд

$$\frac{\partial \varphi(R)}{\partial \vec{n}} = \cos(\vec{n}, \vec{R}) \left(jk - \frac{1}{R} \right) \frac{\exp(jkR)}{R}, \quad (3)$$

де \vec{R} – вектор, що з'єднує точку \vec{r}' з точкою \vec{r} .

Підставимо (2), (3) у (1) і виключимо особливу точку \vec{r}' , рис. 1, де $R = 0$, та проведемо ряд перетворень [5, 6]. Тоді отримаємо формулу для розрахунку поля в точці з координатами \vec{r}' за даними значень поля (граничних умов) на поверхні D

$$E(\vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \int_D \left(\varphi(\vec{r}_D) \frac{\partial E(\vec{r}_D)}{\partial \vec{n}} - E(\vec{r}_D) \frac{\partial \varphi(\vec{r}_D)}{\partial \vec{n}} \right) d\vec{r}_D = \frac{1}{4\pi} \int_D \left\{ \begin{aligned} &\frac{\partial E(\vec{r}_D)}{\partial \vec{n}} \frac{\exp(jkR_D)}{R_D} - \\ &- E(\vec{r}_D) \frac{\partial}{\partial \vec{n}} \left[\frac{\exp(jkR_D)}{R_D} \right] \end{aligned} \right\} d\vec{r}_D. \quad (4)$$

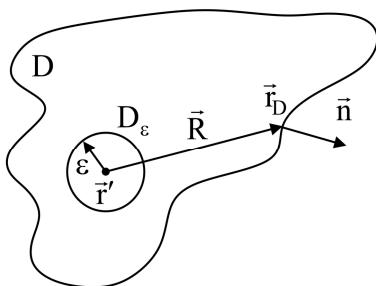


Рис. 1. Поверхня, за якою виконується інтегрування

Співвідношення (4) має назву інтегральної теореми Кірхгофа-Гельмгольца. Згідно цієї теореми, для розрахунку поля в точці \vec{r} необхідно знати не лише граничні умови, тобто значення цього поля на поверхні $E(\vec{r}_D)$, але і значення похідних $\partial E(\vec{r}_D) / \partial \vec{n}$. Зазвичай отриманий результат використовують для розрахунку поля в різних точках простору за даними поля і його похідної в отворі на плоскому непрозорому екрані. Проте теорему (4) можна

узагальнити для плоскої чи сферичної (з радіусом, що дорівнює радіусу Землі) підстильної поверхні з граничними умовами, що описують довільні поверхні з мінливим рельєфом, рослинністю та іншими електрофізичними параметрами та статистичними характеристиками. Для розрахунку поля поза екраном за даними його граничних умов в площині отвору, рис. 2, поверхню D представляють у вигляді суми трьох поверхонь D_∞ , $D_{отв}$, $D_{екр}$.

Граничні умови на поверхні D_∞ , згідно умови Зоммерфельда

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R \left[\frac{\partial E(\vec{r}_D)}{\partial \vec{n}} - jkE(\vec{r}_D) \right] = 0, \quad (5)$$

дорівнюють нулю. На поверхні непрозорого екрану Кірхгоф також запропонував вважати граничні умови нульовими

$$E(\vec{r}_D) = 0, \quad \partial E(\vec{r}_D) / \partial \vec{n} = 0. \quad (6)$$

В такому разі

$$E(\vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \int_{D_{отв}} \left(\varphi(\vec{r}_D) \frac{\partial E(\vec{r}_D)}{\partial \vec{n}} - E(\vec{r}_D) \frac{\partial \varphi(\vec{r}_D)}{\partial \vec{n}} \right) d\vec{r}_D, \quad (7)$$

де $\vec{r}_D \in D_{отв}$.

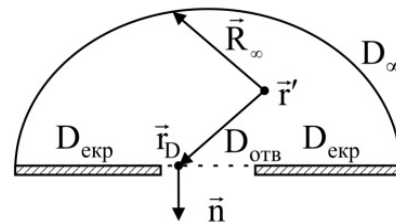


Рис. 2. Геометрія задачі дифракції на прозорому екрані

Підставляючи в формулу Кірхгофа (7) функцію Гріна (2) та її похідну (3), отримуємо

$$E(\vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \int_{D_{отв}} \left[\frac{\partial E(\vec{r}_D)}{\partial \vec{n}} - jkE(\vec{r}_D) \cos(\vec{n}, \vec{R}) \right] \frac{\exp(jkR)}{R} d\vec{r}_D. \quad (8)$$

В отворі екрану граничні умови повинні бути такими, як і у разі відсутності екрану. Ці умови достатньо суперечливі. По-перше, поле після дифракції на краях екрану заходить в область тіні. По-друге, з теорії аналітичних функцій комплексної змінної (теорії потенціалу) випливає, що якщо на будь-якому кінцевому відрізку кривої потенційна функція перетворюється в нуль, то вона перетворюється в нуль на всій площині. Таким чином, перетворення в нуль одночасно двох граничних умов означає перетворення їх в нуль і у площині отвору, що суперечить фізичним явищам наявності поля в області отвору. Однак,

незважаючи на ці суперечності, "воістину дивно [5], що теорія Кірхгофа дає такі точні результати на практиці". Особливо добре теоретичні результати, які використовують граничні умови Кірхгофа, узгоджуються з експериментом, коли розміри області і відстань значно перевищують довжину хвилі [5].

Зоммерфельд у 1896 р [5, 8] спробував зняти суперечливі умови теорії Кірхгофа щодо одночасної рівності нулю функцій $E(\vec{r}_D)$ та $\partial E(\vec{r}_D)/\partial \vec{n}$ на поверхні екрану $D_{екр}$ та їх наявності в отворі екрану $D_{оме}$. Він запропонував замість функції Гріна (2) використовувати функцію Гріна у вигляді двох сферичних хвиль, що зсунуті за фазою на 180° і створені двома точковими джерелами, які розташовані симетрично один відносно одного

$$\varphi(R) = \frac{\exp(jkR)}{R} - \frac{\exp(jkR_1)}{R_1}, \quad (9)$$

де $R = |\vec{r} - \vec{r}'|, R_1 = |\vec{r} - \vec{r}'_1|$.

В результаті отримано вираз

$$E(\vec{r}') = \frac{1}{j\lambda} \int_{D_{оме}} E(\vec{r}_D) \cos(\vec{n}, \vec{R}) \frac{\exp(jkR)}{R} d\vec{r}_D, \quad (10)$$

що складає суть теорії Релея-Зоммерфельда. Ця теорія повністю відповідає принципу Гюйгенса-Френеля.

Окрім наведених скалярних формул Кірхгофа існує інтегральний розв'язок на основі векторної форми теореми Гріна, що враховує векторний характер поля та граничні умови для електричної та магнітної компонент поля. В літературі цей розв'язок називають векторизованими формулами Кірхгофа [5] або формулами Стреттона-Чу [9-11]

$$\begin{aligned} \vec{E} &= -(4\pi)^{-1} \int_D \{ j\omega\mu_a[\vec{n}\vec{H}] \varphi(R) - \\ &- [[\vec{n}\vec{E}] grad \varphi(R)] - (\vec{n}\vec{E}) grad \varphi(R) \} d\vec{r}, \\ \vec{H} &= -(4\pi)^{-1} \int_D \{ j\omega\epsilon[\vec{n}\vec{H}] \varphi(R) + \\ &+ [[\vec{n}\vec{H}] grad \varphi(R)] + (\vec{n}\vec{H}) grad \varphi(R) \} d\vec{r}. \end{aligned} \quad (11)$$

Грунтовний аналіз цих формул, їх зв'язок з формулою Кірхгофа та умови, при яких можна використовувати скалярну формулу (4) для розрахунку електромагнітних полів НВЧ антен, наведені в роботі Фрадїна А. З. [11]. З аналізу випливає, що формули Стреттона-Чу відображають більш правильну картину поля на значних відстанях від антени, проте "з достатньою точністю [11] можна визначити поле згідно формули (4) в області незначного тілесного кута поблизу максимуму випромінювання антени з надзвичайно гострою спрямованістю".

Наведені фундаментальні теорії дифракції достатньо схожі і подальше використання тієї чи іншої формули на практиці залежить від умов проведення експерименту та можливостей виконання аналітичних розрахунків. Наприклад в роботі [12] Ритов С.М., Кравцов Ю.А. і Татарский В.І. приводять дво-

членну формулу (4) до одночленної для випадку визначення поля $E(\vec{r})$, коли поверхня D з заданими граничними умовами є плоскою та замкнутою півсферою нескінченно великого радіуса. Якщо на площині задано поле $E(\vec{r}_D)$, то інтеграл по нескінченно віддаленій сфері перетворюється в нуль, і тоді

$$E(\vec{r}') = -\frac{1}{2\pi} \int_D E(\vec{r}_D) \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\exp(jkR_D)}{R_D} \right] d\vec{r}_D. \quad (12)$$

У випадку коли на площині задана нормальна похідна $\partial E(\vec{r}_D)/\partial z$, то (4) спрощується наступним чином:

$$E(\vec{r}') = \frac{1}{2\pi} \int_D \frac{\partial E(\vec{r}_D)}{\partial z} \frac{\exp(jkR_D)}{R_D} d\vec{r}_D. \quad (13)$$

В роботі [9] Зубкович С.Г. при визначенні віддзеркаленого поля від шорсткої поверхні використовував обидві формули (4) і (11), вважаючи, що поверхня сполучена з нижньою частиною області D , а верхня частина віддалена у нескінченність. При цьому, для поверхонь з малими нерівностями у порівнянні з довжиною хвилі та пологими нахилами, він використовує скалярну формулу (4), а для поверхонь з великими розмірами нерівностей – векторну формулу (11). В той самий час А. Ісімару в [13] навпаки для визначення коефіцієнту віддзеркалення від дрібношорсткої поверхні використовує векторну формулу (11), а для поверхні з великими нерівностями – скалярну формулу (4).

Аналізуючи наведені засади теорії дифракції та принципи розрахунку електромагнітного поля, доцільно ввести узагальнююче визначення когерентного зображення поверхні, як "граничних значень" поля на цій поверхні. Іншими словами у якості когерентного зображення будемо вважати просторово-розподілені граничні умови, що задані у вигляді неперервних функцій просторових координат $E(\vec{r}_D)$ з неперервними першими та другими похідними, що задовольняють хвильовим рівнянням.

2. Феноменологічне визначення розсіяного електромагнітного поля

В зв'язку з постійним удосконаленням оптикоелектронних та радіотехнічних систем дистанційного зондування виникають нові задачі розробки відповідних моделей визначення когерентних зображень. Наведене загальне визначення лише показує зміст когерентного зображення і не дає інформацію про зв'язки параметрів поверхонь та середовищ з характеристиками розсіяного електромагнітного поля. В той самий час розробка адекватних електродинамічних моделей на основі точних математичних розрахунків достатньо трудомістка і потребує спрощених постановок задач. Тому пропонується використати феноменологічний метод визначення поля, що не суперечить здоровому глузду та відповідає основним фізичним та математичним законам розсіювання електромагнітних хвиль на статистично нерівних поверхнях. До

таких законів необхідно віднести закони променевої оптики і закони дифракції, що відображають принцип Гюйгенса-Френеля, в поєднанні з законами теорії ймовірностей і математичної статистики.

Математично сутність феноменологічного підходу можна пояснити таким чином. Порівнюючи між собою (8)-(12), запишемо їх в такому вигляді

$$\dot{E}(\vec{r}') = \int_{D_{ome}} \dot{F}(\vec{r}_D) \frac{\exp(jkR)}{R} d\vec{r}_D, \quad (14)$$

де $\dot{F}(\vec{r}_D)$ може відповідати одному з таких виразів:

$$\dot{F}(\vec{r}_D) = (\partial E(\vec{r}_D) / \partial \vec{n}) - jkE(\vec{r}_D) \cos(\vec{n}, \vec{R}), \quad (15)$$

$$\dot{F}(\vec{r}_D) = (j\lambda)^{-1} E(\vec{r}_D) \cos(\vec{n}, \vec{R}), \quad (16)$$

$$\dot{F}(\vec{r}_D) = \partial E(\vec{r}_D) / \partial z. \quad (17)$$

Операція взяття градієнта у (11) та частинної похідної у (12) від будь-якої з функцій Гріна (2) або (9) призводить до появи співмножника у вигляді сферичної хвилі (2). Тому формули (11) і (12) також можуть бути представлені виразом (14), що відображає класичний принцип Гюйгенса-Френеля.

Таким чином, можна стверджувати, що формула (14) є основою феноменологічного опису поля в точці з координатами \vec{r}' . Її можна розглядати як перше наближення до суворої скалярної теорії дифракції, що дає дуже точні результати, якщо виконуються умови: 1) отвір в екрані великий в порівнянні з довжиною хвилі; 2) дифраговані хвилі спостерігаються не занадто близько від екрану і отвору.

Що стосується задач дистанційного зондування, то формула (14) може бути використана у випадках, коли розміри ділянок поверхонь і відстані до точок спостереження значно перевищують довжину хвилі і у випадках, коли отримати точні електродинамічні моделі поверхонь практично неможливо. В задач активної радіолокації і дистанційного зондування земних поверхонь саме ці випадки найчастіше мають місце. Виконуючи розрахунки згідно формули (14), замість області інтегрування D_{ome} слід розглядати або реальну поверхню, викривлену рельєфом (якщо потрібна інформація про рельєф), або умовну область поверхні, що проходить на деякому середньому рівні щодо положення елементів розсіювання (нерівностей рельєфу, рослинних покривів, листя і т.п.).

Аналізуючи структуру поля згідно формулу (14) назвемо функцію

$$d\dot{Q}(\vec{r}_D) = \dot{F}(\vec{r}_D) d\vec{r}_D$$

комплексним коефіцієнтом розсіювання елементарної площини $d\vec{r}_D$, а функцію

$$\dot{F}(\vec{r}_D) = \frac{d\dot{Q}(\vec{r}_D)}{d\vec{r}_D} \quad (18)$$

питомим комплексним коефіцієнтом розсіювання цієї площини. Саме цей коефіцієнт $\dot{F}(\vec{r}_D)$, що враховує амплітудну і фазову структуру поля, можна

вважати когерентним зображенням середовища, що підлягає подальшому відновленню при обробці прийнятих сигналів в оптико-електронних системах дистанційного зондування.

Розглянемо приклади феноменологічного визначення поля в задачах дистанційного зондування та процес відновлення когерентних зображень.

3. Феноменологічний опис полів в задачах дистанційного зондування

Традиційній постановці задачі дистанційного зондування відповідає геометрія на рис. 3.

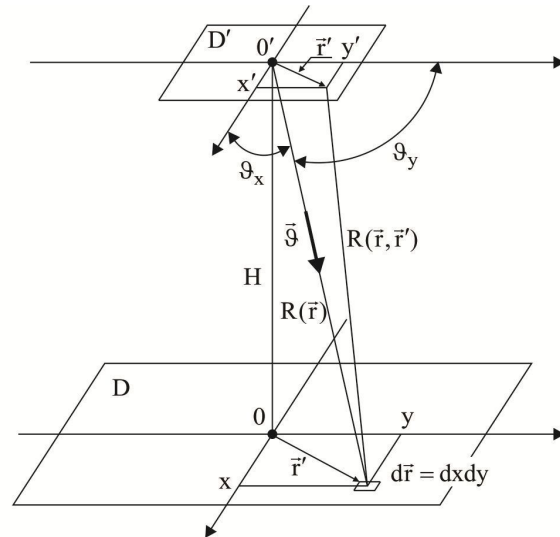


Рис. 3. Геометрія задачі дистанційного зондування

На цьому рисунку D – це поверхня, на якій феноменологічно задані граничні умови у вигляді коефіцієнта розсіювання $\dot{F}(\vec{r}_D)$, D' – область реєстрації сигналів, що прийшли з поверхні D . В кожній точці області $\vec{r}' \in D'$ поле можна представити виразом (14) з заміною області інтегрування D_{ome} на область поверхні D

$$\dot{E}(\vec{r}') = \int_D \dot{F}(\vec{r}) \frac{\exp[jkR(\vec{r}, \vec{r}')] }{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r}, \quad (19)$$

де координати \vec{r}_D точок поверхні D для простоти позначені символом \vec{r} .

Область реєстрації сигналів D' може бути однією антеною, антенною решіткою або будь якою системою оптико-електронних сенсорів. Якщо D' – це розкрит апертури однієї антени з амплітудно-фазовим розподілом (АФР) $\dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1)$, то вихідний сигнал представимо таким виразом

$$\begin{aligned} \dot{E}_A(\vec{r}_1) &= \\ &= \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{r}_1) \int_D \dot{F}(\vec{r}) \frac{\exp[jkR(\vec{r}, \vec{r}')] }{R(\vec{r}, \vec{r}')} d\vec{r} d\vec{r}'. \end{aligned} \quad (20)$$

Для формування когерентного зображення $\dot{F}(\vec{r}_1)$ необхідно здійснити фокусування на всі його елементи з координатами $\vec{r}_1 \in D$, що зазвичай дося-

гається методами послідовного або паралельного огляду простору.

В якості прикладу розглянемо конкретні вирази формули (20) для ближньої зони Френеля та дальньої зони Фраунгофера, що залежать від розмірів областей D та D' і відстані між ними. На рис. 3 відстань $R(\vec{r}, \vec{r}')$ має такий вигляд

$$R(\vec{r}, \vec{r}') = \sqrt{H^2 + (x-x')^2 + (y-y')^2}. \quad (21)$$

Якщо функцію $R(\vec{r}, \vec{r}')$ розкласти в ряд Тейлора, то для визначення поля в дальній зоні Фраунгофера необхідні лише перші лінійні члени. Більш близька зона Френеля потребує врахування квадратичних членів. При цьому для визначення поля у кожній з цих зон необхідно, щоб $|x-x'| \ll H$, $|y-y'| \ll H$.

Спочатку розглянемо можливість відновлення когерентного зображення $\dot{F}(x, y)$ в зоні Френеля. Підставляючи (21) в (20) і розкладаючи $R(\vec{r}, \vec{r}')$ в ряд Тейлора до квадратичних членів, отримаємо

$$\begin{aligned} \dot{E}_A(x_1, y_1) = \exp(jkH) \int_{-0,5X'}^{0,5X'} \int_{-0,5Y'}^{0,5Y'} \dot{I}(x', y', x_1, y_1) \times \\ \times \int_{-0,5X}^{0,5X} \int_{-0,5Y}^{0,5Y} \frac{\dot{F}(x, y)}{R(x, y)} e^{jk \left[\frac{(x-x')^2}{2H} + \frac{(y-y')^2}{2H} \right]} dx dy dx' dy', \quad (22) \end{aligned}$$

де $R(x, y) = \sqrt{H^2 + x^2 + y^2} \approx H + x^2/(2H) + y^2/(2H)$.

Внутрішній інтеграл в (22) – це перетворення Френеля функції $\Phi_1(x, y) = \dot{F}(x, y)/R(x, y)$. В нескінченних межах інтегрування це перетворення може бути оберненим, тобто в ідеальному випадку функція $\Phi_1(x, y)$ повністю може бути відновлена. Проте нескінченні межі не можуть бути забезпечені навіть при великих розмірах D і D' . Наближене обернення можна виконати на кінцевій області D' , якщо у якості АФР обрати функцію

$$\dot{I}(x', y', x_1, y_1) = \exp \left\{ jk \left[\frac{(x_1 - x')^2}{2H} + \frac{(y_1 - y')^2}{2H} \right] \right\}. \quad (23)$$

Підставляючи цей вираз в (22), отримаємо

$$\begin{aligned} \dot{E}_A(x_1, y_1) = \exp \left\{ -\frac{jk}{2H} (x_1^2 + y_1^2) \right\} \times \\ \times \int \int \dot{F}(x, y) \frac{\exp[jkR(x, y)]}{R(x, y)} X' Y' \times \\ \times \text{sinc} \left(\frac{k}{H} \frac{X'}{2} (x - x_1) \right) \text{sinc} \left(\frac{k}{H} \frac{Y'}{2} (y - y_1) \right) dx dy. \quad (24) \end{aligned}$$

Перепишемо (24) в загальному вигляді

$$\dot{E}_A(x_1, y_1) \exp \left\{ \frac{jk}{2H} (x_1^2 + y_1^2) \right\} = \hat{\Phi}(x, y) =$$

$$= \int \int_{XY} \dot{\Phi}(x, y) \Psi(x - x_1, y - y_1) dx_1 dy_1, \quad (25)$$

де $\dot{\Phi}(x, y) = \dot{F}(x, y) \cdot \exp[jkR(x, y)]/R(x, y)$,

$$\begin{aligned} \Psi(x - x_1, y - y_1) = \\ = X' Y' \text{sinc} \left(\frac{k}{H} \frac{X'}{2} (x - x_1) \right) \text{sinc} \left(\frac{k}{H} \frac{Y'}{2} (y - y_1) \right) \quad (26) \end{aligned}$$

– функція, що визначає роздільну здатність відновлення функції $\dot{\Phi}(x, y)$ і когерентного зображення

$$\hat{F}(x, y) = \hat{\Phi}(x, y) R(x, y) \exp[-jkR(x, y)]. \quad (27)$$

Вид функції $\Psi(x - x_1, y - y_1)$ показаний на рис. 4. Роздільна здатність визначається шириною цієї функції, яка на нульовому рівні дорівнює

$$\Delta x = \lambda H / X', \quad \Delta y = \lambda H / Y'. \quad (28)$$

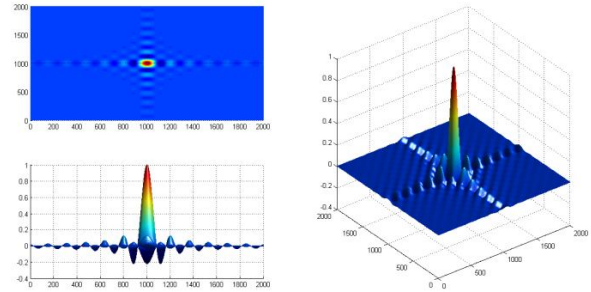


Рис. 4. Вигляд функції $\Psi(x - x_1, y - y_1)$

Остаточно вираз (25) представимо в наступному вигляді

$$\begin{aligned} \dot{E}_{A1}(x_1, y_1) = \\ = \int \int \dot{F}(x, y) \varphi[R(x, y)] \Psi(x - x_1, y - y_1) dx dy, \quad (29) \end{aligned}$$

де $\dot{E}_{A1}(x_1, y_1) = \dot{E}_A(x_1, y_1) \exp \left\{ \frac{jk}{2H} (x_1^2 + y_1^2) \right\}$,

$$\varphi[R(x, y)] = \exp[jkR(x, y)]/R(x, y).$$

Для визначення поля і процесу відновлення когерентного зображення в дальній зоні Фраунгофера знехтуємо квадратичними членами x'^2 і y'^2 в (21)

$$R(x, x', y, y') = R(x, y) - \bar{r}' \bar{\Theta}(x, y), \quad (30)$$

де $\bar{\Theta}(x, y) = (\Theta_x = \cos \theta_x = x / R(x, y), \quad \Theta_y = \cos \theta_y = y / R(x, y))$ – направляючі косинуси, що визначають кутові координати різних елементів поверхонь з площею $d\vec{r} = dx dy$.

В такому разі (20) представимо як

$$\dot{E}_A(x_1, y_1) = \int_{-X'/2}^{X'/2} \int_{-Y'/2}^{Y'/2} \dot{I}(x', y', x_1, y_1) \int_{-X'/2}^{X'/2} \int_{-Y'/2}^{Y'/2} \frac{\dot{F}(x, y)}{R(x, y)} \times$$

$$\times \exp\{jkR(x, y) - \vec{r}'\vec{\vartheta}(x, y)\} dx dy dx' dy' \quad (31)$$

або у кутових координатах

$$\dot{E}_A(\vec{\vartheta}_1) = \int_{D'} \dot{I}(\vec{r}', \vec{\vartheta}_1) \times \int_{\Theta} \dot{F}(\vec{\vartheta}) \frac{\exp[jkR(\vec{\vartheta})]}{R(\vec{\vartheta})} \exp(-jk\vec{r}'\vec{\vartheta}) d\vec{\vartheta} d\vec{r}' \quad (32)$$

Внутрішній інтеграл – це перетворення Фур'є функції $\dot{\Phi}(\vec{\vartheta}) = \dot{F}(\vec{\vartheta})\varphi[R(\vec{\vartheta})]_{\vec{\vartheta} \in \Theta}$.

Наближено оцінку функції $\dot{\Phi}(\vec{\vartheta})$ находимо, виконав зворотне перетворення Фур'є в кінцевих межах області D' з АФР $\dot{I}(\vec{r}', \vec{\vartheta}_1) = \exp(jk\vec{r}'\vec{\vartheta}_1)$. Ця операція забезпечує фокусування антени на напрямках $\vec{\vartheta}_1$ і відповідно на елемент поверхні $d\vec{r} = dx dy$ з координатами (x_1, y_1) .

Перепишемо (32) в загальному вигляді

$$\dot{E}_A(\vec{\vartheta}_1) = \int_{\Theta} \dot{F}(\vec{\vartheta}) \varphi[R(\vec{\vartheta})] \Psi(\vec{\vartheta}_1 - \vec{\vartheta}) d\vec{\vartheta}, \quad (33)$$

де

$$\Psi(\vec{\vartheta}_1 - \vec{\vartheta}) = X'Y' \operatorname{sinc}\left[k(\vartheta_{1x} - \vartheta_x) \frac{X'}{2}\right] \operatorname{sinc}\left[k(\vartheta_{1y} - \vartheta_y) \frac{Y'}{2}\right] \quad (34)$$

– діаграма спрямованості антени.

Від кутових координат $\vec{\vartheta}$ можна перейти до координат поверхні $\vec{r} = (x, y) \in D$, $\vec{r}_1 = (x_1, y_1) \in D$

$$\dot{E}_A(\vec{r}_1) = \int_{\Theta} \dot{F}(\vec{r}) \varphi[R(\vec{r})] \Psi(\vec{r}_1 - \vec{r}) d\vec{r}. \quad (35)$$

Роздільна здатність антени, так само як і в ближній зоні Френеля, відповідає виразам (28).

Наявність функції $\varphi[R(\vec{r})]$ під знаком інтеграла в виразах (29), (33) і (35) відповідає масштабному (у межах ширини функції $\Psi(\cdot)$) спектральному перетворенню когерентного зображення $\dot{F}(\vec{r})$, у результаті якого згідно теорії резонансного розсіювання відновлюються лише певні компоненти функції $\dot{F}(\vec{r})$.

Висновки

Розглядаючи основні засади теорії дифракції, показано, що існує декілька теорій визначення електромагнітного поля у будь якій точці об'єму за даними значень поля на його поверхні. Використовуючи наведені теореми для реальних поверхонь виникають складні аналітичні вирази, що потребують спрощень для їх подальшої реалізації на практиці. На основі феноменологічного опису запропоновано узагальнене визначення поля у вигляді інтегралу від комплексного коефіцієнта розсіювання елемента поверхні та функції Гріна. Запропоновану феноменологічну модель можна розглядати як перше наближення до суворої скалярної теорії дифракції. З наведених прикладів визначення поля в зонах Френеля та Фраунгофера слідує, що використаний підхід для обґрунтування поняття когерентного зображення дозволяє коректно ставити і вирішувати задачі оптимальної обробки сигналів в системах дистанційного зондування природних середовищ. Для розробки достовірних імітаційних моделей систем формування когерентних зображень згідно наведеної формули (14), необхідно додатково виконати їх аналіз на основі понять міри множини, інтегралів Стілтєса, Лібега та стохастичних інтегралів Іто.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Volosyuk V.K., Zhyla S.S. Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, Kiev, 2017, pp. 189-193. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100471
2. V. Pavlikov, V. Volosyuk, S. Zhyla, H. N. Van and K. N. Van, "UWB active aperture synthesis radar the operating principle and development of the radar block diagram," 2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), Kiev, 2017, pp. 27-30. doi: 10.1109/MRRS.2017.8075018
3. V. V. Pavlikov, N. V. Ruzhentsev, A. D. Sobkolov, A. I. Tsopa and D. S. Sal'nikov, "Millimeter-range radiometric system for perspective problems of meteorology and telecommunication," 2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kiev, 2017, pp. 46-51. doi: 10.1109/ICATT.2017.7972583
4. P. Hunziker, O. V. Morozov, O. V. Volosyuk, V. K. Volosyuk and S. S. Zhyla, "Improved method of Optical Coherence Tomography imaging," 2016 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Lviv, 2016, pp. 421-424. doi: 10.1109/MMET.2016.7544109
5. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику / Дж. Гудмен. - М.: Мир, 1970. - 364 с.
6. Борн М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф. - М.: Наука, 1973. - 720 с.
7. Гольдштейн Д.Д. Электромагнитные поля и волны / Д. Д. Гольдштейн, Н. В. Зернов. - М.: Изд-во "Советское радио", 1956. - 638 с.
8. Зоммерфельд А. Оптика / А. Зоммерфельд. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1953. - 486 с.
9. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности / С. Г. Зубкович. - М.: Советское радио, 1968. - 224 с.
10. Жуковский А. П. Теоретические основы радиовысотометрии / А.П. Жуковский, Е.И. Оноприенко, В.И. Чижов. - М.: Советское радио, 1979. - 320 с.
11. Фрадин А. З. Антенны сверхвысоких частот / А. З. Фрадин. - М.: Сов. Радио, 1957. - 648 с.
12. Рытов С. М. Введение в статистическую радиофизику / С. М. Рытов, Ю. А. Кравцов, В. И. Татарский. Часть II. - М.: Наука, 1978. - 463 с.
13. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах / А. Исимару. Т. 1,2 - М.: Мир, 1981. - 280 с.

REFERENCES

1. Volosyuk, V.K. and Zhyla, S.S. (2017), Optimal radar cross section estimation in synthetic aperture radar, *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2017, Kiev, pp. 189-193. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100471.
2. Pavlikov, V.V., Volosyuk, V.K., Zhyla, S.S., Van, H. N. and Van, K. N. (2017), UWB active aperture synthesis radar the operating principle and development of the radar block diagram, *2017 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*, 2017, Kiev, pp. 27-30. doi: 10.1109/MRRS.2017.8075018
3. Pavlikov, V.V., Ruzhentsev, N.V., Sobkolov, A.D., Tsopa, A. I. and Sal'nikov, D.S. (2017), Millimeter-range radiometric system for perspective problems of meteorology and telecommunication, *2017 XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*, 2017, Kiev, pp. 46-51. doi: 10.1109/ICATT.2017.7972583
4. Hunziker, P., Morozov, O. V., Volosyuk, O. V., Volosyuk, V. K. and Zhyla, S.S. (2016), Improved method of Optical Coherence Tomography imaging, *2016 IEEE International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET)*, 2016, Lviv, pp. 421-424. doi: 10.1109/MMET.2016.7544109
5. Goodman, J.W. (1970), "Vvedeniye v fur'ye-optiku" [Introduction to Fourier optics], Mir, Moscow, 364 p.
6. Born, M. (1973), "Osnovy optiki" [Fundamentals of Optics], Nauka, Moscow, 720 p.
7. Gol'dshteyn, D.D. and Zernov, N. V. (1956), "Elektromagnitnyye polya i volny" [Electromagnetic fields and waves], Sovetskoye radio, Moscow, 638 p.
8. Zommerfel'd, A. (1953), "Optika" [Optics], Izdat. inostrannoy literatury, Moscow, 486 p.
9. Zubkovich, S. G. (1968), "Statisticheskiye kharakteristiki radiosignalov, otrazhenykh ot zemnoy poverkhnosti" [Statistical characteristics of radio signals reflected from the earth's surface], Sovetskoye radio, Moscow, 224 p.
10. Zhukovskiy, A.P., Onopriyenko, Ye.I. and Chizhov V.I. (1979), "Teoreticheskiye osnovy radiovysotometrii" [Theoretical bases of radio altimeters], Sovetskoye radio, Moscow, 320 p.
11. Fradin, A.Z. (1957), "Antenny sverkhvysokikh chastot" [Ultrahigh frequency antennas], Sovetskoye radio, Moscow, 648 p.
12. Rytov, S. M., Kravtsov, Yu. A. and Tatarskiy, V. I. (1978), "Vvedeniye v statisticheskuyu radiofiziku" [Introduction to statistical radiophysics], Nauka, Moscow, 463 p.
13. Isimaru, A. (1981), "Rasprostraneniye i rasseyaniye voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh" [Waves propagation and scattering in randomly inhomogeneous media], Mir, Moscow, 280 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л. Ф. Купченко,
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків
Received (Надійшла) 14.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2018

**Феноменологическое описание когерентного изображения поверхности
в оптико-электронных и радиотехнических системах дистанционного зондирования**

В. К. Волосюк, С. С. Жила

Проанализированы основные принципы скалярной теории дифракции и фундаментальные теоремы расчета поля в любой точке объема по данным значений поля на его поверхности. Из анализа следует, что общим определением когерентного изображения среды является пространственно-распределенные граничные условия, заданные в виде непрерывных функций пространственных координат поля на поверхности с непрерывными первыми и вторыми производными. Конкретизация этих условий для реальных земных покровов значительно усложняет решение дифракционных задач, поэтому предложено использовать феноменологическое описание полей в области их регистрации. Приведенные примеры феноменологического определения поля в зоне Френеля и Фраунгофера при решении задач дистанционного зондирования. Показан процесс восстановления когерентных изображений с помощью обратных преобразований и проанализировано их разрешение.

Ключевые слова: основы теории дифракции, когерентное изображения, феноменологическое описание, разрешение, зона Френеля, зона Фраунгофера.

**Phenomenological description of the surface coherent image
in the optical-electronic and radio engineering systems of remote sensing**

V. Volosyuk, S. Zhyla

The basic principles of the scalar theory of diffraction, Huygens-Fresnel principle and fundamental theorems of calculation of the field in any point of volume according to the field and its first derivative on the surface enclosing this volume are analyzed. It follows from the analysis that the general definition of the coherent image is Kirchhoff boundary conditions, in other words the spatial distributed boundary conditions specified in the form of continuous functions of spatial coordinates of the field on a surface with continuous first and second derivatives. The specification of these conditions for real terrestrial covers, such as roughness surfaces or two-scale surfaces, considerably complicates the solution of diffraction problems. That is why the phenomenological description of the scattered fields is suggested. The examples of phenomenological definition of the field in Fresnel and Fraunhofer zones are given. It's shown that complete recovery of coherent images can be achieved by applying inverse transforms with infinite limits of integration. However infinite limits can't be provided even for the big sizes of scattering and receiving areas. The process of coherent images recovery in radio engineering system with finite antenna size is shown and limit resolution of such images is analyzed. Both recovered images, in Fresnel and Fraunhofer zones, have the same Green function. This fact corresponds to the theory of resonant scattering.

Keywords: basis of the diffraction theory, coherent images, phenomenological description, resolution, Fresnel zone, Fraunhofer zone.

Е. Л. Казаков¹, А. Е. Казаков², В. М. Решетник³

¹ Летная академия Национального авиационного университета, Кропивницький, Україна

² Харьковская государственная академия культуры, Харьков, Україна

³ Харьковский Национальный университет радиотехники, Харьков, Україна

ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ МАТРИЦ РАССЕЯНИЯ ЦЕЛЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ПОЛЯ АНТЕН РЛС

Предметом изучения в статье являются процессы управления поляризацией поля антенных систем для решения прикладных задач распознавания радиолокационных целей. **Целью** является получение матричных выражений для пересчета элементов поляризационной матрицы рассеяния (ПМР) цели из произвольного базиса в ортогональный. **Задачи:** повышение скрытности и помехозащищенности работы РЛС; проанализировать существующий математический аппарат для получения матричных выражений; выбрать эффективный алгоритм его применения. Исполняемыми **методами** являются: математические модели оптимизации, методы решения матричных задач. Получены следующие **результаты**. В общем виде получены матричные выражения, позволяющие производить пересчет элементов ПМР цели, измеренных в произвольном поляризационном базисе РЛС, с учетом характеристик этого базиса, в линейный ортогональный базис. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: получены матричные выражения позволяющие по измеренным при управлении поляризацией поля антенн РЛС, элементам ПМР цели и характеристикам данного поляризационного базиса, рассчитать элементы ПМР цели в ортогональном поляризационном базисе РЛС; при проведении расчетов необходимо учитывать возможные ошибки получения элементов ПМР в заданном ортогональном поляризационном базисе. Эти ошибки обусловлены приближением ортов разных поляризаций, на передачу и прием, друг к другу при управлении поляризацией антенн.

Ключевые слова: радиолокационная цель, поляризационная матрица рассеяния цели, поляризационный измерительный базис, характеристики измерительного базиса.

Введение

Постановка проблемы. В настоящее время большое внимание уделяется распознаванию различных классов радиолокационных целей (РЛЦ) при использовании различных видов сигналов, в том числе и поляризационная матрица рассеяния (ПМР). Одновременно для повышения скрытности работы РЛС или с целью увеличения ее потенциала необходимо излучать зондирующие сигналы на произвольных эллиптических поляризациях. Помехозащищенность РЛС также требует в общем случае использования произвольного эллиптического базиса приемной антенны. В тоже время использование при распознавании РЛЦ элементов ПМР, измеренных при произвольном поляризационном базисе (ПБ) антенн, становится невозможным, так как обучение алгоритмов распознавания будет всегда проводиться в заранее известном и ортогональном базисе. Поэтому, получение ПМР в ортогональном ПБ по измеренным комплексным амплитудам отраженных сигналов при произвольных базисах передающей и приемной антенн РЛС становится актуальным. В статье в общем виде получены матричные выражения, позволяющие производить пересчет элементов ПМР цели, измеренных в произвольном ПБ РЛС, с учетом характеристик этого базиса, в линейный ортогональный базис. Рассмотрены три частных случая пересчета элементов ПМР цели при управлении поляризацией поля антенн РЛС.

Анализ последних исследований и публикаций. Возможностям и методам измерения элементов ПМР целей посвящено большое количество научной литературы. В частности эти вопросы подробно рассмотрены в [1 - 5]. Однако, в большинстве источни-

ков приводятся примеры измерений элементов ПМР в ортогональных поляризационных базисах. При необходимости рассматриваются методы пересчета измеренных элементов ПМР цели из одного ортогонального измерительного базиса РЛС в другой [1, 2]. В общем виде расчетные выражения для пересчета элементов ПМР цели, измеренных в ПБ при управлении поляризацией антенн РЛС в ортогональный базис, не получены.

Целью статьи является получение матричных выражений, позволяющих пересчитать измеренные при произвольных базисах передающей и приемной антенн РЛС элементы ПМР цели в ортогональный поляризационный базис.

Основной материал

Пусть необходимо получить ПМР цели в ортогональном линейном базисе (y, x) . Здесь и в дальнейшем первый символ обозначает базис приемной антенны РЛС, а второй – передающей. Тогда матрица комплексных амплитуд отраженных сигналов $E_0^{(y)}$ через матрицу комплексных амплитуд излученных сигналов $E_p^{(x)}$ и ПМР объекта $S^{(y,x)}$ в базисе (y, x) может быть записана в виде:

$$E_0^{(y)} = S^{(y,x)} E_p^{(x)}. \quad (1)$$

Допустим далее, что базис передающей антенны изменился, и излучение сигналов произошло в базисе $p(\bar{p}_1, \bar{p}_2)$, а прием отраженных сигналов осуществился в базисе $q(\bar{q}_1, \bar{q}_2)$ (рис. 1). В общем случае \bar{p}_1, \bar{p}_2 и \bar{q}_1, \bar{q}_2 могут быть произвольными комплексными числами.

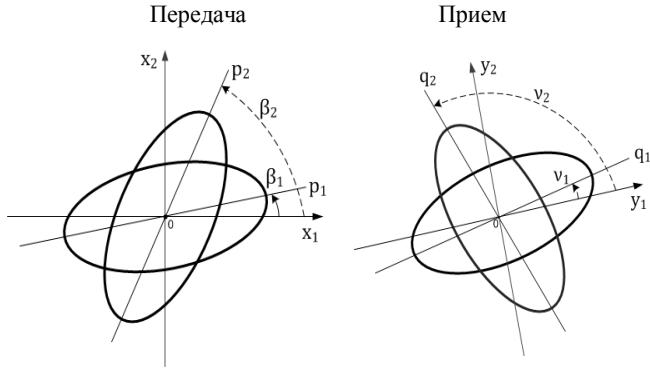


Рис. 1. Базис передающей и приемной антенн

Тогда матрицы комплексных амплитуд излученных и принятых сигналов с учетом изменения поляризационных базисов можно записать в виде:

$$\begin{aligned} E_p^{(x)} &= F_p^{(x,p)} E_p^{(p)}, \\ E_o^{(y)} &= F_o^{(y,q)} E_o^{(q)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $F_p^{(x,p)}, F_o^{(y,q)}$ - матрицы перехода от базиса (\vec{p}) к базису (\vec{x}) и от базиса (\vec{q}) к базису (\vec{y}) .

Производя матричные преобразования (2) и используя их в (1), получим:

$$E_o^{(q)} = F_o^{(y,q)^{-1}} S^{(y,x)} F_p^{(l,p)} E_p^{(p)}, \quad (3)$$

или
$$E_o^{(q)} = S^{(q,p)} E_p^{(p)}, \quad (4)$$

где
$$S^{(q,p)} = F_o^{(y,q)^{-1}} S^{(y,x)} F_p^{(x,p)}. \quad (5)$$

Тогда искомую матрицу в ортогональном базисе (\vec{y}, \vec{x}) можно из выражения (5) записать в виде:

$$S^{(y,x)} = F_o^{(y,q)} S^{(q,p)} F_p^{(x,p)^{-1}}. \quad (6)$$

Таким образом, используя выражение (6) можно получить ПМР объекта в ортогональном базисе и в дальнейшем использовать ее для распознавания.

Для определения матриц пересчета $E_o^{(y,q)}$ и $E_p^{(x,p)}$ воспользуемся рис. 1. Из него следует, что базисные эллиптические поляризации на передачу характеризуются углами наклона эллипсов поляризации β_1, β_2 и углами эллиптичности $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, а на прием - углами наклона эллипсов поляризации ν_1, ν_2 и углами эллиптичности α_1, α_2 [5]. Тогда матрицы пересчета имеют вид:

$$F_o^{(y,q)} = \begin{pmatrix} \cos \nu_1 \cos \alpha_1 - \cos \nu_2 \cos \alpha_2 - \\ -j \sin \nu_1 \sin \alpha_1 & -j \sin \nu_2 \sin \alpha_2 \\ \sin \nu_1 \cos \alpha_1 + \sin \nu_2 \cos \alpha_2 + \\ +j \cos \nu_1 \sin \alpha_1 & +j \cos \nu_2 \sin \alpha_2 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$F_p^{(p,x)} = \begin{pmatrix} \cos \beta_1 \cos \varepsilon_1 - \cos \beta_2 \cos \varepsilon_2 - \\ -j \sin \beta_1 \sin \varepsilon_1 & -j \sin \beta_2 \sin \varepsilon_2 \\ \sin \beta_1 \cos \varepsilon_1 + \sin \beta_2 \cos \varepsilon_2 + \\ +j \cos \beta_1 \sin \varepsilon_1 & +j \cos \beta_2 \sin \varepsilon_2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Обратная матрица $(F_p^{(p,x)})^{-1}$ в соответствии с [4] имеет вид:

$$\begin{aligned} (F_p^{(p,x)})^{-1} &= \\ &= \frac{1}{D_p} \begin{pmatrix} \sin \beta_2 \cos \varepsilon_2 + & -\cos \beta_2 \cos \varepsilon_2 + \\ = j \cos \beta_2 \sin \varepsilon_2 & +j \sin \beta_2 \sin \varepsilon_2 \\ -\sin \beta_1 \cos \varepsilon_1 - & \cos \beta_1 \cos \varepsilon_1 - \\ -j \cos \beta_1 \sin \varepsilon_1 & -j \sin \beta_1 \sin \varepsilon_1 \end{pmatrix}, \quad (9) \end{aligned}$$

где
$$D_p = \sin(\beta_2 - \beta_1) \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - \\ -j \cos(\beta_1 + \beta_2) \sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2).$$

Рассмотрим в качестве примеров некоторые возможные частные случаи управления поляризацией поля антенн РЛС и проанализируем получаемые при этом выражения для матриц пересчета $F_o^{(y,q)}$ и $F_p^{(x,p)}$.

1. Если базис приемной антенны q является линейным ортогональным, но его базовые поляризации не совпадают с осями \vec{y}_1 и \vec{y}_2 , то есть $\nu_1 \neq 0$, а $\nu_2 - \nu_1 = 90^\circ$ (рис. 2), то матрица преобразования $F_o^{(y,q)}$ превратится в обычную матрицу поворота

$$F_o^{(y,q)} = \begin{pmatrix} \cos \nu_1 & \cos \nu_2 \\ \sin \nu_1 & \sin \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \nu_1 & -\sin \nu_1 \\ \sin \nu_1 & \cos \nu_1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

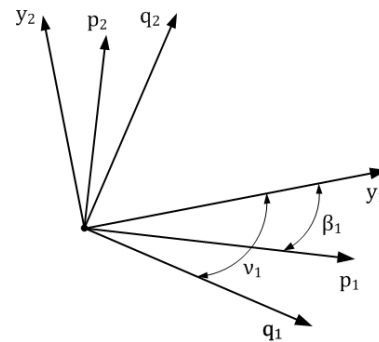


Рис. 2. Базис приемной антенны q

Легко заметить, что, если базис передающей антенны p будет ортогональным ($\beta_1 \neq 0^\circ, \beta_2 - \beta_1 = 90^\circ$), то матрица преобразования $(F_p^{(p,x)})^{-1}$ будет также представлять собой матрицу поворота

ортогональном ПБ РЛС. Однако, при проведении расчетов необходимо учитывать возможные ошибки получения элементов ПМР в заданном ортогональном ПБ. Эти ошибки обусловлены приближением ортов разных поляризацій, на передачу и прием, друг к другу при управлении поляризацией антенн.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Канарейкин Д. Б. Поляризация радиолокационных сигналов / Д. Б. Канарейкин, Н. Ф. Павлов, В. А. Потехин. – М.: Сов. радио, 1966. – 440 с.
2. Распознавание радиолокационных целей по сигнальной информации. Монография / Е. Л. Казаков, Д. Г. Васильев, А. Е. Казаков, Д. Н. Рыжов, А. В. Коломийцев; под ред. Е. Л. Казакова. – Х.: КП «Міська друкарня». 2010. – 232 с.
3. Казаков Е. Л. Поляризационные методы распознавания радиолокационных целей / Е. Л. Казаков, А. Е. Казаков // Прикладная радиоэлектроника. – Харьков : ХНУРЕ, 2002 – Т. 1., № 2. – С. 155 – 163.
4. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 510 с.
5. Казаков Е. Л. Распознавание целей по сигнальной информации в однопозиционных и многопозиционных локаторах / Е. Л. Казаков, А. Е. Казаков, А. В. Коломийцев; под ред. Е. Л. Казакова. – Х.: ХУВС, 2015. – 459 с.

REFERENCES

1. Kanareikin, D.B., Pavlov, N.F. and Potekhin, V.A. (1966), *Polarization of radar signals*, Sov. radio, Moscow, 440 p.
2. Kazakov, E.L., Vasiliev, D.G., Kazakov, A.E., Ryzhov, D.N. and Kolomyitsev, A.V. (2010), *Recognition of radar targets based on signal information*, edited by Kazakov, E.L., Miska drukarnya, Kharkiv, 232 p.
3. Kazakov, E.L. and Kazakov, A.E. (2002), "Polarization methods for recognizing radar targets", *Applied radioelectronics*, KHNURE, Kharkiv, Vol. 1., No. 2, pp. 155-163.
4. Shirman, Ya.D. (2007), *Radioelectronic systems. Fundamentals of construction and theory*, Moscow, Radio engineering, 510 p.
5. Kazakov, E.L., Kazakov, A.E. and Kolomyitsev A.V. (2015), *Recognition of the targets for signal information in single-position and multi-position locators*, KhUPS, Kharkiv, 459 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. М. Биков, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків
Received (Надійшла) 14.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2018

Можливості отримання поляризаційних матриць розсіяння цілей при управлінні поляризацією поля антен РЛС

С. Л. Казаков, О. Е. Казаков, В.М. Решітник

Предметом вивчення в статті є процеси управління поляризацією поля антенних систем для вирішення прикладних завдань розпізнавання радиолокаційних цілей. **Метою** є отримання матричних виразів для перерахунку елементів поляризаційної матриці розсіювання (ПМР) цілі з довільного базису в ортогональний. **Завдання:** підвищення скритності і перешкодозахищеності роботи РЛС; проаналізувати існуючий математичний апарат для отримання матричних виразів; вибрати ефективний алгоритм його застосування. Використаними **методами** є: математичні моделі оптимізації, методи вирішення матричних задач. Отримані наступні **результати**. У загальному вигляді отримані матричні вирази, що дозволяють здійснити перерахунок елементів ПМР цілі, виміряних в довільному поляризаційному базисі РЛС, з урахуванням характеристик цього базису, в лінійний ортогональний базис. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: отримані матричні вирази, що дозволяють по виміряним при управлінні поляризацією поля антен РЛС, елементам ПМР цілі і характеристикам даного поляризаційного базису, розрахувати елементи ПМР цілі в ортогональному поляризаційному базисі РЛС; при проведенні розрахунків необхідно враховувати можливі помилки отримання елементів ПМР в заданому ортогональному поляризаційному базисі. Ці помилки обумовлені наближенням ортів різних поляризацій, на передачу і прийом, один до одного при управлінні поляризацією антен.

Ключові слова: радіолокаційна ціль, поляризаційна матриця розсіювання цілі, поляризаційний вимірювальний базис, характеристики вимірювального базису.

Possibilities of obtaining polarization scattering matrixs for polarization of radar antenna field

Ye. Kazakov, O. Kazakov, V. Reshetnik

The **subject** of the study in the article are the processes of controlling the polarization of the field of antenna systems for solving applied problems of radar target recognition. The **goal** is to obtain matrix expressions for recalculating the elements of the polarization scattering matrix (PMR) of a target from an arbitrary basis to an orthogonal one. The **tasks:** increase stealth and noise immunity of the radar; analyze the existing mathematical apparatus for obtaining matrix expressions; choose an effective algorithm for its application. The **methods** used are: mathematical optimization models, methods for solving matrix problems. The following **results** are obtained. Generally, matrix expressions are obtained that allow the recalculation of the target PMR elements measured in an arbitrary polarization basis of the radar, taking into account the characteristics of this basis, into a linear orthogonal basis. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results consists in the following: matrix expressions are obtained that allow us to calculate the target PMR elements in the orthogonal polarization basis of the radar from the radar antenna fields, target PMR and characteristics of the polarization basis measured during the polarization control; when making calculations it is necessary to take into account possible errors in obtaining PMR elements in a given orthogonal polarization basis. These errors are due to the approximation of the units of different polarizations, to transmission and reception, to each other when controlling the polarization of the antennas.

Keywords: radar target, polarization target scattering matrix, polarization measuring basis, characteristics of the measuring base.

А. М. Коржов¹, А. М. Артеменко², О. В. Костянець¹, О. В. Струцінський³

¹ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

² Генеральний штаб Збройних Сил України, Київ, Україна

³ В/ч 2533, Дніпро, Україна

ОСОБЛИВОСТІ БАГАТОЧАСТОТНИХ СИГНАЛІВ ТА ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В РЛС ВИЯВЛЕННЯ МАЛОВИСОТНИХ ЦІЛЕЙ НАД МОРЕМ

Предметом вивчення в статті є багаточастотні (БЧ) радіолокаційні станції (РЛС) виявлення маловисотних цілей над морем в умовах перешкод. **Метою** є підвищення ефективності БЧ систем виявлення цілей в умовах перешкод. **Завдання:** аналіз БЧ сигналів при послідовному формуванні їх складових з використанням аналітичних виразів для довільного БЧ сигналу; математичне моделювання двовимірних кореляційних функцій для різних фазочастотних кодів МЧ сигналу; розробити рекомендації по застосуванню в РЛС виявлення маловисотних цілей. Використовуваними **методами** є: методи статистичної радіотехніки, теорії вірогідності і математичної статистики. Отримані наступні **результати**. Отримані частотно-часова діаграма, амплітудно-частотний спектр (АЧС), двовірна кореляційна функція невизначеності, а також нормовані автокореляційна (АКФ) і частотнокореляційна (ЧКФ) функції для різних фазочастотних кодів БЧ сигналу. Проаналізовані смуга когерентності, тривалість головної пелюстки і рівень бічних пелюсток АКФ імпульсного БЧ сигналу із складовими без внутрішньої модуляції та імпульсного БЧ сигналу з лінійночастотномодульованими складовими з різними кодами по частоті і фазі, а також різною шириною спектру дискрет і різним їх рознесенням по частоті. **Висновки.** Проведений порівняльний аналіз основних видів послідовних БЧ сигналів дозволяє сформулювати рекомендації відносно їх застосування в РЛС виявлення маловисотних цілей в різних умовах перешкодової обстановки. А саме, послідовні БЧ з суцільним АЧС доцільніше використовувати для підвищення характеристик виявлення маловисотних цілей в радіолокаційному каналі (РЛК) над морем у флукуаційних перешкодах, а сигнали огинаюча та АЧС яких не суцільні доцільніше використовувати в умовах навмисних нестационарних в часі і нерівномірних по частоті перешкодах. Послідовні БЧ сигнали з прямокутною огинаючою та АЧС, що складається з АЧС частотних складових, які перетинаються, доцільніше використовувати для підвищення характеристик виявлення маловисотних цілей над морем в РЛК з модулюючими перешкодами.

Ключові слова: багаточастотні сигнали, послідовні імпульсні багаточастотні сигнали, радіолокаційна станція виявлення, маловисотна ціль, когерентність сигналів.

Вступ

Постановка проблеми. На сучасному етапі розвитку радіотехнічних засобів в умовах масованого нальоту із застосуванням всього арсеналу засобів вогневого придушення і радіоелектронної боротьби актуальним є виявлення маловисотних цілей, наприклад, ударних або розвідувальних безпілотних літальних апаратів, гелікоптерів, некерованих ракет, літаків та повітряних шарів. Це завдання може бути вирішене з використанням високо-інформаційних перешкодо-захисних радіолокаційних станцій [1, 3-6]. Як відомо [5, 6], інформативність радіолокаційних станцій (РЛС) визначається, у першу чергу, базою зондувальних сигналів $D = \Delta f_c \cdot \tau_c$ (Δf_c , τ_c – ширина спектра та тривалість зондуючого сигналу). Найбільш просто більші значення D реалізуються за допомогою складних сигналів з внутріімпульсною або міжперіодною модуляцією (маніпуляцією) амплітуди, фази, частоти [8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз [1, 2] показує, що виявлення маловисотних цілей в тропосферному радіолокаційному каналі (РЛК) може бути покращено при використанні складених по частоті, багаточастотних (БЧ) сигна-

лів. Це пов'язано з тим, що в таких умовах поширення радіохвиль «луна-сигнали» та їх амплітудно-частотні спектри (АЧС) постійно змінюються (флукутують) при відносному руху елементів РЛК. Негативний вплив флукуацій відбитих сигналів на характеристики РЛС може бути усунутий або, принаймні, зменшений, якщо вдасться яким-небудь чином добитися їхнього згладжування. Одним зі способів згладжування є застосування складних сигналів. Прикладом такого складного сигналу можуть бути БЧ сигнали [6, 8]. Реалізація переваг багаточастотних сигналів в значній мірі залежить не тільки від характеру флукуацій відбитих від цілі сигналів, а й від їх параметрів й засобів обробки.

Виграш у дальності виявлення маловисотних цілей у тропосферному РЛК БЧ РЛС може складати до 30% у порівнянні з одночастотною РЛС при тих же потужностях випромінювання та ЕПР цілі [2, 7]. Але при багаточастотній роботі може виникати протиріччя між вимогами до параметрів зондуючого сигналу й небажаними наслідками від використання такого сигналу для локації маловисотних цілей (МЦ) у тропосферному радіохвилеводі. У результаті цього реалізовані тактико-технічні характеристики РЛС можуть виявитися значно гіршими потенційно можливих. Реалізація переваг багаточастотної РЛС у

значній мірі залежить від відношення сигнал-шум (СШ) на вході приймача РЛС і вибору виду і параметрів зондуючого сигналу.

Тому в статті проведено порівняння основних видів послідовних багаточастотних сигналів і сформульовані рекомендації щодо їх застосування в радіолокаційних станціях виявлення маловисотних цілей в умовах перешкод.

Мета статті: Провести порівняння основних видів послідовних багаточастотних сигналів і сформулювати рекомендації щодо їх застосування в радіолокаційних станціях виявлення маловисотних цілей в умовах перешкод.

Виклад основного матеріалу

На основі загальноприйнятих відомостей [3, 4, 7], можна вважати, що БЧ сигнали складають окремий вид радіолокаційних сигналів і мають загальні властивості. Вони можуть розділятися на сигнали з одним ступенем ортогональності (паралельні БЧ сигнали) та сигнали з подвійним ступенем ортогональності (послідовні БЧ сигнали).

Проведемо аналіз БЧ сигналів при послідовному формуванні їх складових. Ці сигнали мають енергетичний вигреш при порівнянні з БЧ сигналами, у яких складові формуються паралельно, що дозволяє більш просто реалізувати БЧ сигнали з більшою базою і отримати кращі характеристики виявлення маловисотних цілей в умовах перешкод [8].

Аналіз властивостей імпульсних багаточастотних послідовних сигналів (БЧ ПОС) проведемо за виразами для довільного БЧ сигналу, його комплексної обвідної, спектральної щільності комплексних обвідних узагальненого БЧ сигналу та однієї частотної дискрети, двовимірної кореляційної функції комплексної обвідної узагальненого БЧ сигналу, а також автокореляційної функції (АКФ) та частотно-кореляційної функції (ЧКФ) узагальненого БЧ сигналу [8, 9]. Комплексну огинаючу БЧ ПОС для вагової функції $A_\gamma(f) = 1$ можливо записати:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{БЧС}(t) &= \sum_{\gamma=1}^N p_\gamma(t) U_\gamma [t - (\gamma - 1)\tau_0] \times \\ &\times \exp[j2\pi(\gamma p_\gamma(f) - 1)\Delta f_\gamma t + \varphi_\gamma] =, \quad (1) \\ &= \sum_{\gamma=1}^N U_\gamma [t - \Delta\tau_\gamma] \exp[p_\gamma(j2\pi\Delta f_\gamma t)] \end{aligned}$$

де $\gamma \in \overline{1, N}$ – дійсне ціле число; N – кількість складових; τ_0 – тривалість однієї складової БЧ сигналу; Δf_γ – зміщення γ -тої складової сигналу за частотою; φ_γ – початкова фаза γ складової; $\Delta\tau_\gamma$ – затримка γ -тої складової сигналу за часом; p_γ – амплітудно-часочастотний код БЧ сигналу; $U_\gamma(t)$ – комплексна огинаюча однієї частотної складової БЧ ПОС.

В свою чергу спектр комплексної огинаючої БЧ ПОС може бути представлений у вигляді:

$$\begin{aligned} \dot{G}_{БЧС}(2\pi f) &= \sum_{\gamma=1}^N \dot{G}_\gamma [2\pi f - (\gamma - 1)2\pi\Delta f_\gamma] \times \\ &\times \exp[-j2\pi f(\gamma - 1)\Delta\tau_\gamma + \varphi_\gamma] =, \quad (2) \\ &= \sum_{\gamma=1}^N \dot{G}_\gamma [2\pi(f - \Delta f_\gamma)] \cdot \exp[-j2\pi f\Delta\tau_\gamma + \varphi_\gamma] \end{aligned}$$

де $G_\gamma(f)$ – АЧС однієї частотної складової БЧ ПОС.

Виконавши перетворення (2), отримаємо двомірну кореляційну функцію невизначеності (ДКФН) комплексної огинаючої цього сигналу:

$$\begin{aligned} R(\tau, F) &= \frac{1}{N} \sum_{\gamma=1}^N \sum_{\mu=1}^N R_0(\tau_{\gamma, \mu}, F_{\gamma, \mu}) \cdot \exp[j2\pi\Delta f_\gamma \tau] = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{\gamma=1}^N \sum_{\mu=1}^N R_0[(\tau - (\gamma - \mu)\Delta\tau_\gamma F + (\gamma - \mu)\Delta f_\gamma \tau] \times \quad (3) \\ &\times \exp[j2\pi\epsilon_R(\tau, F)], \end{aligned}$$

де $R_0(\tau_{\gamma, \mu}, F_{\gamma, \mu})$ – ДКФН комплексної огинаючої однієї частотної складової БЧ ПОС;

$0 \leq \tau \leq \tau_{БЧ ПОС}$, $0 \leq F \leq \Delta f_{БЧ ПОС}$;

$F_{\gamma, \mu} = F + (\gamma - \mu)\Delta f_\gamma$ – зміщена частота Доплера;

$\tau_{\gamma, \mu} = \tau - (\gamma - \mu)\tau_\gamma$ – зміщена затримка.

$\epsilon_R(\tau, F) = (\mu - 1)\Delta f_\gamma \tau + (\gamma - 1)\Delta\tau_\gamma F - (\gamma - \mu)\Delta f_\gamma \Delta\tau_\gamma$ – фазовий множник;

$$R(\tau, 0) = \frac{1}{N} \sum_{\gamma=1}^N \sum_{\mu=1}^N R_0(\tau_{\gamma, \mu}, 0) \exp[j2\pi\Delta f_\gamma \tau],$$

$$R(0, F) = \frac{1}{N} \sum_{\gamma=1}^N \sum_{\mu=1}^N R_0(0, F_{\gamma, \mu}) \quad (4)$$

АКФ і ЧКФ комплексної огинаючої БЧ ПОС.

На основі виразів (3) та (4) було проведено математичне моделювання за допомогою пакета математичних програм (Mathcad) і отримано часочастотна діаграма, АЧС, тіло невизначеності $R(\tau, F)$, нормовані відносно $R(0, 0)$ модулі АКФ $R(\tau, 0)$ і ЧКФ $R(0, F)$ для різних $p_\gamma(a, \varphi, f)$. В якості частотних складових використовувалися прості імпульсні та ЛЧМ сигнали. Огинаючі БЧ ПОС прямокутні ($p_\gamma(a) = 1$, $A_\gamma(t) = 1$). Для спільності, кількість частотних складових становила $N = 5$. Аналізувалася смуга когерентності W_S , тривалість головної пелюстки АКФ τ_{en} і рівень її бокових пелюсток $\frac{U_{\delta n}}{U_{\max}}$.

Проведено порівняння основних видів послідовних БЧ сигналів і сформульовані рекомендації щодо їх застосування в РЛС виявлення маловисотних цілей в умовах перешкод.

Досліджувалися наступні послідовні багаточастотні сигнали:

1. Імпульсний БЧ сигнал, який за часом складався з N складових без внутрішньої модуляції. В якості кодів використовувалися: за частотою

$[p_\gamma(f)]$ - рівномірний код або код Костасу, за фазою $[p_\gamma(\varphi)]$ - рівномірний код або код Баркеру.

2. Імпульсний БЧ сигнал, який за часом складався з N ЛЧМ складових. В якості кодів за фазою $[p_\gamma(\varphi)]$ використовувалися рівномірний код або код Баркеру.

3. Імпульсний БЧ сигнал, який за часом складався з N ЛЧМ складових. В якості кодів використовувалися: за частотою $[p_\gamma(f)]$ - рівномірний код або код Костасу, за фазою $[p_\gamma(\varphi)]$ - рівномірний код або код Баркеру.

4. Імпульсний БЧ сигнал, який за часом складався з N ЛЧМ складових. Але ширина спектра сигналу приблизно дорівнює ширині спектра однієї дискрети, а зміщення дискрет за частотою значно менше ширини спектра однієї дискрети. В якості кодів використовувалися: за частотою $[p_\gamma(f)]$ - рівномірний код або код Костасу, за фазою $[p_\gamma(\varphi)]$ - рівномірний код або код Баркеру. Результати моделювання наведено на рис. 1.

Аналіз отриманих результатів показує, що для послідовних БЧ сигналів, як і для паралельних БЧ сигналів, за інтегральним й похідним критерієм більшу смугу когерентності W_S , (W_S^{2n}) мають БЧ сигнали із суцільним АЧС, а більший час когерентності T_S , (T_S^{2n}) - БЧ когерентні сигнали із прямокутною обвідною. Це можливо пояснити тим, що такі сигнали мають одну зону високої когерентності за часом та частотою. Із послідовних БЧ сигналів, що мають суцільний АЧС, більшу смугу когерентності мають БЧ ПР сигнали. Смуга когерентності БЧ ЛЧМ сигналів близька до смуги когерентності БЧ ПР сигналів. Форма зони когерентності за часом залежить від ваг $A_\gamma(f)$, а за частотою від ваг $A_\gamma(t)$. Рівень бокових пелюсток $(U_{\delta n}/U_{\max})$ послідовних БЧ сигналів із суцільним АЧС співпадає з рівнем бокових пелюсток паралельних БЧ сигналів із суцільним АЧС. Вибір коду $p_\gamma(a, \varphi, f)$ дозволяє додатково керувати формою зони когерентності і рівнем бокових пелюсток. Такі БЧ сигнали доцільно використовувати для покращення виявлення маловисотних цілей у радіолокаційному каналі над морем в флуктуаційних перешкодах [9].

Для сигналів обвідна і АЧС яких не суцільні за інтегральним критерієм смуга когерентності (W_S) й час когерентності (T_S) зменшується пропорційно їх шпаруватості. Це можливо пояснити тим, що такі сигнали мають декілька зон високої когерентності за часом та частотою. Додаткові зони когерентності можна трактувати як появу "далеких" бічних пелюсток АКФ і ЧКФ сигналу, що не змінює тривалість та смугу їх головної пелюстки.

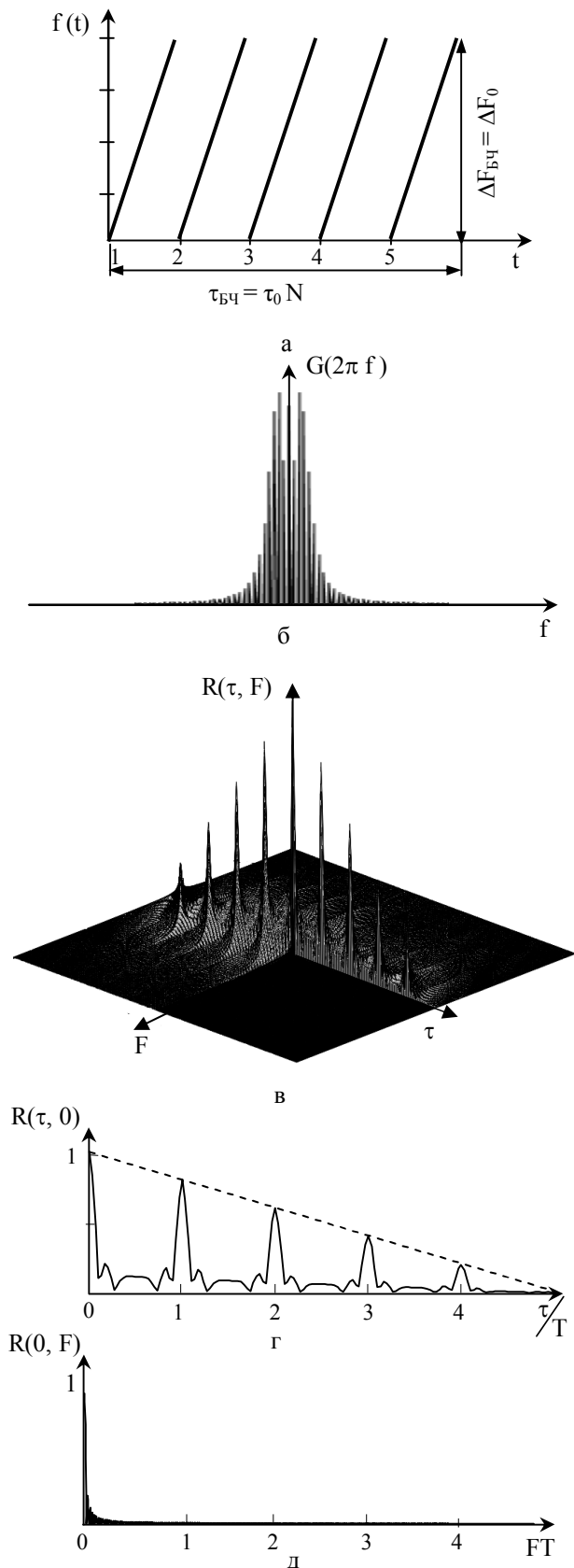


Рис. 1. Частотно-часова діаграма (а); АЧС (б); двовимірна кореляційна функція (в); АКФ (г) і ЧКФ (д) послідовного БЧ ЛЧМ сигналу

Тому за похідним критерієм оцінки смуги (W_S^{2n}) і часу когерентності (T_S^{2n}) визначаються

лише тривалістю сигналів ($\tau_{\delta\omega}$) і шириною їх АЧС ($\Delta F_{\delta\omega}$) відповідно. Кодування по частоті і фазі не дозволяє зменшити амплітуду $U_{\delta\omega}$ "далеких" бічних пелюсток АКФ і ЧКФ послідовних БЧ сигналів обвідна і АЧС яких не суцільні. Рівень "ближніх" бічних пелюсток АКФ послідовних БЧ сигналів визначається видом вагової функції $A_\gamma(f)$, а рівень їх "ближніх" бічних пелюсток ЧКФ - видом вагової функції $A_\gamma(t)$ й при $N \rightarrow \infty$ досить швидко прагне до рівня бічних пелюсток одночастотного сигналу з відповідною частотною або часовою ваговою функцією. "Ближні" бічні пелюстки АКФ і ЧКФ сигналу можна зменшити традиційними (ваговими) методами або кодуванням частотних складових сигналу по частоті і фазі. Такі БЧ сигнали доцільно використовувати для покращення виявлення маловисотних цілей у радіолокаційному каналі над морем в умовах навмисних нестаціонарних в часі і нерівномірних по частоті перешкодах [9].

Для послідовних БЧ сигналів з прямокутною обвідною і АЧС, що складається з АЧС частотних складових, які перетинаються, коефіцієнт перекриття $K_{пер} = \Delta F_0 / \Delta f_\gamma \geq 1$, за інтегральним критерієм смуга когерентності (W_S) визначається тривалістю сигналу ($\tau_{\delta\omega}$), а час когерентності (T_S) зменшується пропорційно $(\Delta F_{\delta\omega}) / \Delta F_{\delta\omega} \leq 1$, де $(\Delta F_{\delta\omega})$ ефективна смуга АЧС сигналу. Нерівномірність АЧС призводить до появи додаткових часових зон когерентності ("далеких" бічних пелюсток АКФ). Амплітуда "далеких" бічних пелюсток $U_{\delta\omega}$ залежить від ступеня перекриття АЧС частотних складових сигналу. Кодування по фазі не дозволяє зменшити "далекі" бічні пелюстки АКФ. Основним методом їх зменшення можна вважати кодування по частоті за кодами Костасу, при яких $(U_{\delta\omega} / U_{max}) \leq -15 [дБ]$.

Рівень "ближніх" бічних пелюсток АКФ послідовних БЧ сигналів $U_{\delta\omega}$ визначається ступенем перекриття спектрів складових сигналу і слабо залежить від частотної вагової функції $A_\gamma(f)$, а рівень їх "ближніх" бічних пелюсток ЧКФ - видом вагової функції $A_\gamma(t)$. За похідним критерієм оцінки смуги (W_S^{zn}) і часу когерентності (T_S^{zn}) визначаються тривалістю сигналів ($\tau_{\delta\omega}$) і шириною їх АЧС ($\Delta F_{\delta\omega}$), відповідно. Такі сигнали доцільно використовувати для покращення виявлення маловисотних цілей над морем у радіолокаційному каналі з модулюючими перешкодами [7].

Для РЛС виявлення маловисотних цілей в радіолокаційному каналі над морем в існуючій заводській обстановці БЧ ЛЧМ сигнали більш універсальні ніж БЧ ПР сигнали. Це пов'язано з тим, що ширина АЧС ЛЧМ сигналів з великою базою мало залежить від їх тривалості. Тому можна вважати їх базовими. Це тим більш справедливо, якщо враховувати особливості формування таких сигналів [9].

Висновки

Проведений порівняльний аналіз основних видів послідовних багаточастотних сигналів за результатами моделювання дозволяє стверджувати, що послідовні БЧ сигнали із суцільним АЧС доцільно використовувати для покращення виявлення маловисотних цілей у радіолокаційному каналі над морем в флуктуаційних перешкодах, а сигнали обвідна і АЧС яких не суцільні доцільно використовувати в умовах навмисних нестаціонарних в часі і нерівномірних по частоті перешкодах. Послідовні БЧ сигнали з прямокутною обвідною і АЧС, що складається з АЧС частотних складових, які перетинаються, доцільно використовувати для покращення виявлення маловисотних цілей над морем у радіолокаційному каналі з модулюючими перешкодами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кеннеди Р. Канали связи с замиранием и рассеиванием / Р. Кеннеди. – М.: Сов. радио, 1973. – 304 с.
2. Калинин А. И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. – М.: Связь, 1979. – 296 с.
3. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Теория обнаружения сигналов / П. С. Акимов, П. А. Бакут, В. А. Богданович и др. – М.: Радио и связь, 1984. – 440 с.
5. Ван-Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции: Пер. с англ. т.3 / Г. Ван-Трис. – М.: Сов. Радио, 1977. – 662 с.
6. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: ЗАО "МАКВИС", 1998. – 828 с.
7. Модель дискретного радиолокационного канала с рассеиванием по времени и частоте / И. Г. Леонов, А. Н. Коржов, Р. Н. Животовский, А. А. Радюков // Сб. научн. тр. ЦНИИ ВВТ ВС Украины, вип. 1(52). – К., 2014. – С. 189-195.
8. Методика сравнительного анализа многочастотных сигналов / И. Г. Леонов, А. Н. Коржов, Р. М. Животовский, В. Н. Петрушенко // Системи озброєння та військова техніка. – Харків: ХУПС, 2013, № 1 (33). – С. 22-25.
9. Леонов І. Г. Компенсація активних прицільних завод у разі використання багаточастотного сигналу / І. Г. Леонов, А. Є. Присяжний // Системи озброєння і військова техніка. – Х.: ХУПС, 2006. – № 3 (7). – С. 42 - 45.

REFERENCES

1. Kennedy, R. (1973), *Channels of communication with stopping beating and dispersion*, Sov. Radio, Moscow, 304 p.
2. Kalinin, A.I. (1979), *Distribution of radio waves on the routes of surface and space radio link*, Svyaz, Moscow, 296 p.
3. Varakin, L.Ye. (1985), *Communication networks with noise-like signals*, Radio i svyaz, Moscow, 384 p.
4. Akimov, P.S., Bakut, P.A. and Bogdanovich, V.A. (1984), *Theory of finding out signals*, Radio i svyaz, Moscow, 440 p.
5. Van-Tris, G. (1977), *Theory of discovery, estimations and modulation*, Sov. Radio, Moscow, 662 p.
6. Shirman, Ya.D. (1998), *Radio electronic systems: Bases of construction and theory*, ZAO "MAKVIS", Moscow, 828 p.

7. Leonov, I.G., Korzhov, A.N., Zhivotovskiy R.N., and Radyukov, A.A. (2014), "Model diskretnogo radiolokatsionnogo kanala s rasseivaniem po vremeni i chastote" [Model of discrete radio-location channel with dispersion at times and to frequency], *Sbornik nauchnykh trudov TsNII VVT VS Ukrainy*, TsNII VVT VSU, Kiev, № 1(52), pp.189-195.
8. Leonov, I.G., Korzhov, A.N., Zhivotovskiy, R.M. and Petrushenko, V.N. (2013), "Metodika sravnitel'nogo analiza mnogochastotnykh signalov" [Method of comparative analysis of multifrequency signals], *Zbirnyk naukovykh prats. Systemy ozbroiennia ta viiskova tekhnika*, KhUPS, Kharkiv, №. 1(33), pp. 22-25.
9. Leonov, I.G. and Prysiaznyi, A.Ie. (2006), "Kompensatsiia aktyvnykh prytsilnykh zavod u razi vykorystannia bahatochasotnoho syhnalu" [Indemnification of active aiming hindrances is in the case of the use of multifrequency signal], *Systemy ozbroiennia i viiskova tekhnika*, KhU PS, Kharkiv, №. 3(7), pp.42-45.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л. Ф. Купченко,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 6.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.04.2018

Особенности многочастотных сигналов и их использование в РЛС обнаружения маловысотных целей над морем

А. Н. Коржов, А. М. Артеменко, О. В. Костянец, О. В. Струцинский

Предметом изучения в статье являются многочастотные (МЧ) радиолокационные станции (РЛС) обнаружения маловысотных целей над морем в условиях помех. **Целью** является повышение эффективности МЧ систем обнаружения целей в условиях помех. **Задачи:** анализ МЧ сигналов при последовательном формировании их составляющих с использованием аналитических выражений для произвольного МЧ сигнала; математическое моделирование двумерных корреляционных функций для разных фазочастотных кодов МЧ сигнала; разработать рекомендации по применению в РЛС обнаружения маловысотных целей. Используемыми **методами** являются: методы статистической радиотехники, теории вероятностей и математической статистики. Получены следующие **результаты**. Получены время-частотная диаграмма, амплитудно-частотный спектр (АЧС), двумерная корреляционная функция неопределенности, а также нормированные автокорреляционная (АКФ) и частотнокорреляционные (ЧКФ) функции для разных фазочастотных кодов МЧ сигнала. Проанализированы полоса когерентности, длительность главного лепестка и уровень боковых лепестков АКФ импульсного МЧ сигнала с составляющими без внутренней модуляции и импульсного МЧ сигнала с линейночастотно модулированными составляющими с разными кодами по частоте и фазе, а также разной шириной спектра дискрет и разным их разносом по частоте. **Выводы.** Проведенный сравнительный анализ основных видов последовательных МЧ сигналов позволяет сформулировать рекомендации относительно их применения в РЛС обнаружения маловысотных целей в различных условиях помеховой обстановки. А именно, последовательные МЧ со сплошным АЧС целесообразнее использовать для улучшения характеристик обнаружения маловысотных целей в радиолокационном канале (РЛК) над морем в флуктуационных помехах, а сигналы огибающая и АЧС которых не сплошные целесообразнее использовать в условиях преднамеренных нестационарных во времени и неравномерных по частоте помехах. Последовательные МЧ сигналы с прямоугольной огибающей и АЧС, что состоит из АЧС частотных составляющих, которые пересекаются, целесообразнее использовать для улучшения обнаружения маловысотных целей над морем в РЛК с модулирующими помехами.

Ключевые слова: многочастотные сигналы, последовательные импульсные многочастотные сигналы, радиолокационная станция обнаружения, маловысотная цель, когерентность сигналов.

Peculiarities of multifrequency signals features and their using in radars for detecting of low-altitude targets over sea

A. Korzhov, A. Artemenko, O. Kostyanets, O. Strutsinskyi

The **subject matter** of the article is multifrequency radars for detecting of low-altitude targets over sea. The **goal** is to increase the efficiency of multifrequency radars for detecting of low-altitude targets over sea. The **tasks** to be solved are: analyzing multifrequency signals in the sequential formation of their components with the use of analytical formulas for a random multifrequency signal; mathematical modeling of two-dimensional correlation functions for different phase-frequency codes of the multifrequency signal; to develop recommendations for the use of low-altitude targets in the radar. The **methods** used are: methods of statistical radio engineering, probability theory and mathematical statistics. The following **results** were obtained: time-frequency diagram, amplitude-frequency spectrum, two-dimensional correlation function of uncertainty, as well as normalized autocorrelation and frequency-correlation functions for different phase frequency codes of the multifrequency signal are obtained. The coherence band, the main lobe duration and the side lobe level of the autocorrelation of the impulse multifrequency signals with components without internal modulation and pulsed multifrequency signals with linearly frequency modulated components with different codes in frequency and phase, as well as different widths of the discrete spectrum and their different frequency spacing are analyzed. **Conclusions.** The comparative analysis of the main types of serial multifrequency signals allows to formulate recommendations regarding their application in the radar for detecting low-altitude targets in various conditions of interference situation is conducted. For example, it is more expedient to use serial multifrequency signals with a continuous amplitude-frequency spectrum to improve the detection characteristics of low-altitude targets in the radar channel over the sea in fluctuation noise. The envelope signals and those ones with a not continuous amplitude-frequency spectrum are more expedient to use under conditions of deliberate time-varying and frequency-non-uniform interference. The serial multifrequency signals with a rectangular envelope and the amplitude-frequency spectrum, which consists of the components of the amplitude-frequency spectrum that intersect, are more suitable for improving the detection of low-altitude targets over the sea in a radar channel with modulating interference.

Keywords: multifrequency signals, serial pulse multifrequency signals, detection radar, low altitude target, coherence of signals.

А. В. Федоров, В. В. Чалий, В. П. Фінаєв

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ МУЛЬТИЛАТЕРАЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Предметом вивчення в статті є система мультilaterації (MLAT) та її взаємодія з існуючими засобами радіолокації під час ведення радіолокаційного контролю (РЛК) повітряного простору. **Метою** є аналіз можливостей використання системи MLAT для підвищення ефективності РЛК повітряного простору. **Завдання:** аналіз основних тенденцій розвитку засобів повітряного нападу, аналіз відомих організаційних та технічних шляхів підвищення ефективності ведення РЛК малопомітних та малорозмірних повітряних об'єктів (ПО), визначення напрямків підвищення можливостей системи MLAT та інформації від існуючих радіолокаційних засобів, аналіз можливості отримання інформації від системи MLAT в радіотехнічних підрозділах, аналіз особливостей та обмежень на використання інформації від системи MLAT. Використовуваними **методами** є: методи визначення координат ПО, різницево-далекомірний метод, методи пасивної радіолокації, методи визначення координат ПО з використанням інформації супутникових навігаційних систем. Отримані такі **результати**. Встановлено, що система MLAT є системою незалежного кооперативного спостереження, в основі роботи системи MLAT покладений відомий далекомірний метод визначення координат ПО, мінімальна кількість пунктів прийому дорівнює трьом, отримано вираз для лінійної похибки різницево-далекомірного методу в системі MLAT, встановлено, що у якості приймачів в системі MLAT можливе використання транспондерів системи ADS-B, наведено декілька варіантів рішення задачі по виявленню потенційно небезпечних ПО, що бажають бути непоміченими, або здійснюють "мімікрію". **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: підвищення точності визначення координат ПО та якості РЛК повітряного простору шляхом поєднання можливостей системи MLAT та інформації від існуючих радіолокаційних засобів; встановлено, що використання системи MLAT суттєво підвищить точність супроводження ПО; намічені шляхи оптимізації геометричної побудови приймачів системи MLAT на позиціях радіотехнічних підрозділів та розробки методу сумісної обробки радіолокаційної інформації та інформації від системи MLAT при РЛК повітряного простору.

Ключові слова: радіолокаційна станція, мультilaterація, MLAT, джерела інформації, повітряна обстановка, залежне спостереження, незалежне спостереження, контроль повітряного простору, координати.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Досвід ведення сучасних мережецентричних, гібридних війн, ведення антитерористичної операції та операції об'єднаних сил (ООС) на сході України свідчить про те, що на даний час розвиток засобів повітряного нападу (ЗПН) проходить за рахунок використання сучасних технологій та відбувається досить стрімко [1, 2].

Відомо [1-4], що історія розвитку засобів збройної боротьби проходить у постійному технічному протистоянні ЗПН та засобів захисту. У відповідь на удосконалення засобів нападу з'являються більш удосконалені засоби захисту. Використання високих технологій у сучасній війні є запорукою успішного ведення бойових дій.

Основні тенденції розвитку ЗПН на сучасному етапі обумовлені впровадженням сучасних технологій та полягають у наступному [1, 3-5]:

- покращення льотно-тактичних характеристик;
- зменшення радіолокаційної помітності;
- вдосконалення бортового радіоелектронного обладнання та вогневих засобів;
- впровадження безпілотного управління та новітніх інформаційних технологій.

Отже, основні тенденції розвитку ЗПН спрямовані на реалізацію концепції адаптивних розвідувально-ударних бойових систем, яка відповідає вимогам безконтактних війн, форми, способи та структура яких можуть створюватися та уточнюватися у

реальному масштабі часу в залежності від обстановки.

Розвиток ЗПН та впровадження перспективних методів ведення бойових дій в єдиному інформаційному просторі зумовлює необхідність розвитку систем виявлення та визначення координат повітряних об'єктів (ПО). Військові конфлікти останніх років показали, що активні первинні радіолокаційні станції (РЛС) залишаються основним джерелом інформації про повітряну обстановку [2, 5].

Створення і підтримка суцільного радіолокаційного поля (РЛП) на малих, середніх та великих висотах залишається важливим завданням радіотехнічних військ (РТВ) Повітряних Сил (ПС) Збройних Сил України (ЗСУ). Від якості РЛП, що створюється, залежить успішність виконання завдань з ведення радіолокаційного контролю (РЛК) повітряного простору. У теперішній час виконання цього завдання ускладнюється внаслідок зменшення радіолокаційної помітності сучасних ЗПН.

РЛК ведеться за допомогою засобів радіолокації, які знаходяться на озброєнні РТВ ПС ЗСУ. До засобів радіолокації належать РЛС та радіолокаційні комплекси, які за призначенням поділяються на РЛС (радіолокаційні комплекси) бойового та чергового режимів [3].

Основними РЛС чергового режиму в радіотехнічних підрозділах є РЛС 5Н84А та модернізована РЛС 5Н84МА, РЛС П-18 та її модифікації РЛС П-18МУ, РЛС П-18МА, РЛС П-18 «Малахіт». Основними РЛС бойового режиму в радіотехнічних

підрозділах є РЛС 19Ж6, РЛС 35Д6 та модернізована РЛС 35Д6М, РЛС П-37 (П-37Р), РЛС 79К6 [6-8].

За результатами аналізу тактико-технічних характеристик (ТТХ) засобів радіолокації радіотехнічних підрозділів ПС ЗСУ [9] встановлено, що вони були розраховані на виявлення повітряних цілей типу винищувача МіГ-21 (МіГ-29). Тому, при виявленні сучасних та перспективних малопомітних та малорозмірних ЗПН спостерігається погіршення можливостей РЛС, які знаходяться на озброєнні РТВ. Зменшення розмірів зон виявлення окремих РЛС приводить до порушення суцільності РЛП і утворенню розривів, які можуть досягати до 80% від потрібного розміру суцільного РЛП.

Найбільш суттєве зменшення зони виявлення РЛС спостерігається в сантиметровому діапазоні, а найменше – в метровому діапазоні. Це зумовлено особливостями відбиття радіохвиль від малорозмірних об'єктів та зменшенням ефективності використання технологій Stealth в метровому діапазоні.

Система РЛК повітряного простору повинна забезпечити вирішення наступних задач [6]:

- безперервність РЛК;
- забезпечення поточною інформацією про повітряну обстановку органів державного та військового управління у мирний та воєнний час;
- своєчасне попередження про повітряний напад;
- забезпечення видачі радіолокаційної інформації з необхідною дискретністю, мінімальним часом запізнювання на військові пункти управління для оцінки повітряної обстановки, вирішення завдань цілерозподілу та управління військами, вогневими засобами, засобами радіоелектронної боротьби;
- інформаційну підтримку бойових дій усіх видів авіації;
- забезпечення контролю законності та порядку використання повітряного простору, виявлення ПО, які представляють собою потенційну загрозу державі або іншим учасникам повітряного руху;
- забезпечення контролю порядку перетинання державного кордону;
- забезпечення безпеки польотів авіації, управління повітряним рухом, радіолокаційне забезпечення польотів та перельотів авіації, запобігання конфліктних ситуацій у повітрі та ін.

Для вирішення покладених завдань просторові показники бойових можливостей системи РЛК повинні у повній мірі забезпечувати виявлення та супроводження ПО в усьому діапазоні можливих висот та швидкостей їх польоту. Водночас, існуюча система РЛК не здатна в повній мірі забезпечити вирішення покладених завдань при застосуванні нових типів малопомітних та малорозмірних ЗПН.

Все це призводить до необхідності розробки організаційних та технічних методів підвищення ефективності виявлення малопомітних ПО.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційними (відомими) організаційними та технічними шляхами підвищення ефективності ведення РЛК малопомітних та малорозмірних ПО є [4, 5]:

- підвищення енергетичного потенціалу та покращення ТТХ РЛС;
- ущільнення розташування РЛС на небезпечних напрямках (створення смуг виявлення маловисотних та малорозмірних цілей);
- одночасне використання РЛС різних діапазонів частот та інші.

Використання традиційних методів підвищення ефективності ведення РЛК малопомітних та малорозмірних ПО приводить до збільшення потрібної кількості РЛС, збільшенню споживаної потужності та, як наслідок, до збільшення вартості створення та утримання чергового РЛП. Вирішення протиріччя між тенденціями зменшення радіолокаційної помітності ЗПН та можливостями існуючих РЛС щодо їх виявлення потребує розробки нових альтернативних та нетрадиційних методів підвищення ефективності виявлення малопомітних ПО.

Альтернативними (перспективними) шляхами підвищення ефективності виявлення малопомітних та малорозмірних ПО є [8]:

- використання енергій сторонніх джерел випромінювання та реалізації режимів рознесеного прийому;
 - використання властивості резонансного відбиття електромагнітних хвиль від ПО при використанні довжин хвиль, які порівняні із розмірами об'єкта;
 - використання властивостей бістатичної ефективної площі розсіювання (ЕПР) при рознесеному прийомі.
- Використання багатопозиційних радіолокаційних систем у порівнянні з однопозиційними РЛС разом з певними недоліками мають ряд переваг:
- підвищення живучості системи за рахунок просторового рознесення приймальних і передавальних позицій;
 - можливість формування і динамічного керування необхідною зоною відповідальності, враховуючи сигнально-завадову обстановку, що очікується, і, що складається;
 - можливість підвищення точності вимірювання просторових координат ПО за рахунок використання далекомірних методів;
 - підвищення надійності за рахунок надлишкового числа приймальних і передавальних позицій та інші.

В якості передавача в багатопозиційній РЛС може використовуватися як спеціальний (з характеристиками класичного локатора), так і нетрадиційний (зовнішній) передавач, що не входить до складу системи. При такій побудові системи забезпечується приховане РЛП та мінімальні енергетичні витрати на функціонування системи.

Одним із варіантів підвищення ефективності ведення РЛК є використання інформації про повітряну обстановку від різнорідних джерел на пунктах управління РТВ. Це може в цілому підвищити ефективність вирішення завдань в системі контролю повітряного простору.

На теперішній час вже існують радіолокаційні системи, які здійснюють виявлення ПО в полі під-

свічування сторонніх джерел радіовипромінювання та використовують властивості бістатичної ЕПР ПО. В якості таких джерел використовуються передавачі системи телерадіомовлення, стільникового зв'язку та інші [9].

Для підвищення ефективності РЛК повітряного простору використовуються системи мультилатерації (MLAT). Існує значний обсяг літератури з технічним описом системи MLAT, її характеристик, переваг та недоліків, можливостей її використання для контролю повітряного простору [1, 10].

В той же час, дослідження стосовно використання цієї систем в інтересах РТВ не проводилися.

Мета статті – аналіз можливостей використання системи MLAT для підвищення ефективності проведення РЛК повітряного простору.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Основними тенденціями розвитку сучасних засобів повітряного нападу щодо зменшення їх радіолокаційної помітності є:

- зменшення геометричних розмірів, що обумовлює зниження ЕПР;
- реалізація можливості зменшення швидкості польоту, що обумовлює режекцію ЗПН в системах селекції рухомих цілей разом з відбиттями від місцевих предметів;
- використання технологій Stealth, що обумовлює зниження значення моностатичної ЕПР;
- використання композитних матеріалів, що обумовлює зниження ЕПР до величин (0,005-0,1 м²);
- застосування малопотужних економічних двигунів, що робить політ безпілотного літального апарату практично безшумним;
- зменшення вартості розробки та експлуатації безпілотний літальний апарат у порівнянні з вартістю сучасних пілотованих засобів, що виконують аналогічні функції.

Це приводить до погіршення ефективності виявлення ЗПН в оглядових РЛС, які знаходяться на озброєнні РТВ ПС ЗСУ, що обумовлюється малими значеннями ЕПР ПО (0,005-0,3 м²).

На період до 2025 року основними об'єктами радіолокації для РТВ ПС є аеродинамічні цілі:

- з очікуваним значенням ЕПР від 0,005 до 10 м²,
- швидкістю польоту від 10 м/с до 1200 м/с;
- діапазоном висот – від 20 до 30000 м.

Зменшення ЕПР ПО приводить до зменшення потенціальної дальності їх виявлення. Ця залежність визначається виразом (1):

$$D_2 = D_1 \sqrt[4]{\frac{\sigma_2}{\sigma_1}}, \quad (1)$$

де D_1 – дальність виявлення ПО з ЕПР σ_1 ;

D_2 – дальність виявлення ПО з ЕПР σ_2 .

Одним із варіантів підвищення ефективності ведення РЛК є використання інформації про повітряну обстановку від різномірних джерел на пунктах управління РТВ. Це може в цілому підвищити ефек-

тивність вирішення завдань в системі РЛК повітряного простору.

У якості різномірних джерел у статті розглядається система мультилатерації [15].

Системи MLAT відносять до систем незалежного кооперативного спостереження. Незалежність системи означає, що система не залежить від даних навігаційних систем ПС, кооперативність – цю інформацію можуть отримувати як наземні станції підрозділів керування повітряним рухом так і ПО.

Система представляє собою сукупність ідентичних приймачів, які розташовані визначеним чином. В основу роботи системи покладений відомий різницево-далекомірний метод визначення координат повітряного об'єкта.

Мультилатерація або гіперболічне позиціонування - процес визначення положення, заснований на різниці в часі прибуття (Time Difference of Arrival (TDOA)) сигналу, випромінюваного об'єктом в напрямку трьох або більше приймачів.

Надісланий об'єктом сигнал буде отриманий двома далеко розташованими один від одного датчиками в різний час, це залежить від відстані між датчиком і об'єктом. Різниця в часі між двома приймачами зпівставляється з гіперболою (в тримірному просторі), на якому знаходиться ПО.

В основі роботи різницево-далекомірного методу покладено вимірювання відносної затримки сигналів, які приймаються в трьох пунктах прийому, та визначенні лінії переміщення (ЛП) (гіпербол), а також вирахування координат точки перетину ЛП. Нехай пункти прийому знаходяться в рознесених точках спостереження A1, A2, A3, ПО – в точці M. Відстані між точками A1, A2, A3 позначені відповідно d12, d23, відстані від пунктів прийому до ПО позначені D1, D2, D3.

Фокуси гіпербол співпадають з точками спостереження (рис. 1).

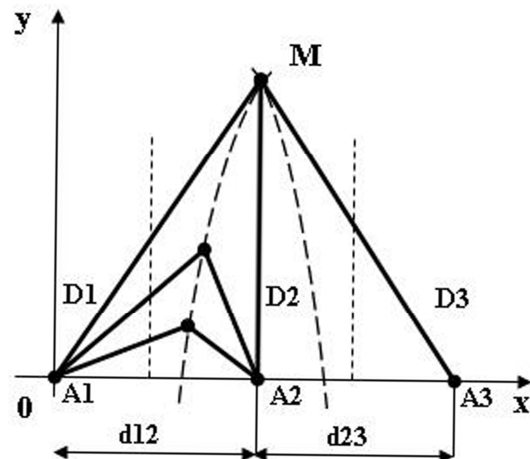


Рис. 1. Різницево-далекомірний метод визначення положення ПО

Різниці відстаней визначаються шляхом виміру відносного запізнення сигналів між пунктами прийому та позначаються: $P_{12} = const = D_1 - D_2$ та $P_{23} = const = D_2 - D_3$.

Просторове положення ПО визначається по трьом різницям дальностей, які були виміряні в приймальних пунктах.

Координати ПО визначаються як точка перетину гіперболоїдів обертаня.

Лінійна похибка методу визначається за виразом (2):

$$\sigma_L(D_1 - D_2) = \frac{\sigma(D_1 - D_2)}{2 \sin \phi}, \quad (2)$$

де σ - середньоквадратичне відхилення визначення P_{12} ;

ϕ - кут A_1MA_2 .

Зазвичай бази d12 та d23 розташовуються не на одній лінії, а під кутом, що складає від 60 до 90°.

В якості приймачів системи MLAT пропонується використовувати транспондери ADS-B.

Слід зазначити, що не всі, навіть сучасні ПО, обладнані подібною апаратурою [16]. Наприклад, більшість літаків "Embraer" не обладнані такими транспондерами. Також не обладнані літаки "McDonnell Douglas MD-83", що використовуються однією з українських авіакомпаній. Більшість літаків, що виготовлені за радянських часів, не мають такого обладнання. Але зараз практично всі сучасні ПО мають спроможність роботи в режимі «S» системи вторинної локації RBS. В режимі вторинної локації сучасні ПО відповідають на сигнали запитів трасових локаторів УПР. Відповідь здійснюється на тій же частоті, що і ADS-B, а саме 1090 МГц. Відповідно приймач ADS-B здатен приймати і сигнали відповідей ПО на запити трасових локаторів. А так як сучасні повітряні судна практично завжди здійснюють політ в полі трасових локаторів, то практично завжди присутні сигнали відповідей. Аналізуючи ці сигнали, можна отримати ті ж самі дані, що від ADS-B, за винятком поточних координат. Так, використовуючи дані цих сигналів, можна отримати інформацію про адресу ICAO, висоту, SQUAWK, позивний. Для визначення координат ПО, що не передає своїх координат можна використовувати технологію MLAT.

Для використання різницево-далекомірною багатопозиційного способу виявлення координат потрібно обробляти сигнали щонайменше від трьох приймачів, маючих просторовий рознос та точну синхронізацію часу. Точна прив'язка часу (до 50 нс) може здійснюватися за допомогою GPS приймачів.

Технологію MLAT використовує широко відомий Інтернет ресурс "FlightRadar", де здійснюється обробка сигналів від тисяч ADS-B приймачів.

Під час ведення радіолокаційного контролю повітряного простору, за умови сумісного використання технології MLAT та вже існуючих засобів радіолокації задача дещо може бути спрощена. При організації взаємодії з органами управління повітряним рухом (УПР) та отримання від них радіолокаційної інформації від вторинних локаторів, що працюють в режимах "A" та "C" RBS присутня інформація про висоту ПО та код SQUAWK. Згідно з правилами виконання польотів в зоні дії трасового ло-

катора коди SQUAWK не повинні повторюватися (за виключенням спеціальних 2000, 7000, 7500, 7600, 7700) [16]. Таким чином, по коду SQUAWK можна ототожнити дані про координати ПС від вторинного локатора та дані режиму "S" RBS від приймача ADS-B.

Особливості та обмеження використання системи MLAT

Враховуючи технічні характеристики приймачів ADS-B, є можливість отримання додаткової інформації про ПО та підвищення точності їх супроводу [16].

А, враховуючи максимальну дальність дії, що складає приблизно 400 км, можна отримувати дані від ПО, що не входять у повітряний простір України і відповідно про які нема відомостей у органах управління повітряним рухом України. Тобто з'являється можливість отримувати дані про ПО, що здійснюють польоти вздовж кордону України, не перетинаючи його.

Однак для забезпечення отримання якомога точних координат ПО, що не входять у повітряний простір України, використовуючи технологію MLAT, необхідно забезпечити оптимальне геометричне розміщення приймачів системи.

Крім того приймачі повинні розташовуватися на достатньо великій відстані один від одного, в іншому випадку точність визначення координат ПО на великій відстані може бути визначена з великою похибкою.

Таким чином, використовуючи принцип технології MLAT можна розмістити по одному приймачу ADS-B на позиціях окремих мобільних радіотехнічних підрозділів, таким чином створивши необхідну геометрію розташування приймачів в системі MLAT для більш якісного обчислення координат ПО в необхідній зоні.

Але не слід забувати і про те, що використовуючи дані від приймачів ADS-B, слід бути обережними, оскільки противник може свідомо створювати ці дані з метою організації провокаційних дій. Існує декілька прикладів введення спотворених даних про ПО [16].

По-перше, можна виготовити радіопередавальний пристрій, що буде випромінювати сигнали від реально не існуючих ПО. У цьому випадку технологія MLAT є одним з найбільш ефективних способів боротьби з порушеннями подібного роду. MLAT дозволяє визначити координати розташування такого передавача. Додатково, використовуючи дані приймачів ADS-B, є можливість порівняти дані ADS-B з даними, що отримуються від радіолокаційних засобів для виявлення таких «віртуальних» цілей.

По-друге, ще одним способом спотворення може бути підміна координат в повідомленнях ADS-B. Більш того, такі спотворення можуть надходити від законослухняних користувачів повітряного простору. Наприклад, якщо супутниковій навігаційній системі літака поставити відповідні завади [16]. Виявлення таких спотворень здійсню-

ється також порівнянням з радіолокаційними даними або застосування технології MLAT.

По-третє, противник може підмінити в повідомленнях адреси ICAO ПО. Наприклад, літак-розвідник “мімікрує” під реально існуючий пасажирський літак Boeing-737, дані про який присутні в базі даних. Виявити таку підміну шляхом порівняння з радіолокаційними даними або використання технології MLAT неможливо.

Проте існує декілька варіантів рішення задачі по виявленню таких потенційно небезпечних ПО.

По-перше, від органів УПР потрібно постійно отримувати дані по запланованим перельотам і перевіряти цю інформацію з поточними даними про повітряну обстановку. Однак, у цьому випадку є можливість оперувати лише даними про ПО, що здійснюють політ тільки у межах повітряного простору України.

По-друге, існує вірогідність того, що ПО під яке здійснюється “мімікрія”, саме в даний час виконує політ. Тоді, в різних точках повітряного простору будуть спостерігатися два, або навіть більше ПО з однаковим номером ICAO. Наявність такої ситуації свідчить про факт підміни.

По-третє, законослухняний ПО використовує ADS-B протягом всього польоту. ПО порушник буде використовувати підміну тільки на деяких ділянках польоту.

Таким чином, законослухняний ПО, що здійснює переліт, буде виявлятися на максимальній

дальності виявлення приймача для висоти польоту ПО. Відповідно, якщо в системі ADS-B виявляється ПО всередині зони дії приймача на великій висоті польоту (тобто ПО не здійснює зліт з аеродрому), то це може свідчити про можливе спотворення даних ADS-B [16].

Висновки і напрямки подальших досліджень

В роботі основна увага приділена системі незалежного кооперативного спостереження MLAT. Розглянуті можливості отримання даних від системи MLAT в радіотехнічних підрозділах. У якості приймачів системи мультilaterації запропоновано використання приймачів системи ADS-B. Показано, що за рахунок цих даних можна отримати додаткову інформацію стосовно типів ПО, що супроводжуються, їх позивні та рейси (для рейсових літаків). Встановлено, що використання системи MLAT суттєво підвищить точність супроводження ПО. Також наведені деякі обмеження на використання цих даних у радіотехнічних підрозділах.

В подальших дослідженнях необхідно вирішення наступних задач:

- оптимізація геометричної побудови системи приймачів MLAT на позиціях радіотехнічних підрозділів;

- розробка методу сумісної обробки радіолокаційної інформації та інформації від системи MLAT при веденні РЛК.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Артеменко А. М., Певцов Г. В. Тенденції розвитку Повітряних Сил Збройних Сил України на основі аналізу досвіду проведення АТО. Новітні технології — для захисту повітряного простору: Тези допов. 11 наук. конф. Харк. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (Харків 8–9 квіт. 2015). Х.: ХУПС, 2015. – С. 16.
2. Савин Л. В. Сетевая и сетевая война. Введение в концепцию. М.: Евразийское движение, 2011. – С. 130.
3. Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації / А. М. Алімпієв, Г. В. Певцов, Д. А. Гриб. Х.: Оригінал, 2015. – С. 732.
4. Информационный сборник «Особенности боевого применения высокоточных средств поражения и способы повышения эффективности борьбы с ними»: Кибалко И.П., Черный Ю.Н. (ред.). Минск: 1034 ЦВИАИ, 2008. – С. 102.
5. Романченко І.С., Загорка О.М., Бутенко С.Г., Дейнега О.В. Теорія і практика боротьби з малорозмірними низьколітніми цілями (оцінка можливостей, тенденції розвитку засобів протиповітряної оборони): монографія. Житомир: Полісся, 2011. – С. 344.
6. Вишневецький С.Д., Бейліс Л.В. Погляди на розвиток радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України. Новітні технології — для захисту повітряного простору: Тези допов. 11 наук. конф. Харк. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (Харків 8–9 квіт. 2015). Х.: ХУПС, 2015. – С. 15.
7. Белавін О.В. Погляди на розвиток озброєння та військової техніки радіотехнічних військ Повітряних Сил Збройних Сил України. Новітні технології — для захисту повітряного простору: Тези допов. 13 наук. конф. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба (Харків 12–13 квіт. 2017). Х.: ХУПС, 2017. – С. 18-19.
8. Образцов Е.А., Пушкин О.В. Маловысотные РЛС: шаг за шагом. Воздушно-космическая оборона. 2012. № 4. С. 17–22.
9. Griffiths H. D. From a Different Perspective: Principles, Practice and Potential of Bistatic Radar. International Conference on Radar. (Adelaide, Australia, 3–5 September 2003). Adelaide, 2003. – P. 1–7.
10. Аналіз ефективності використання системи mlat в аеропортах для контролю повітряного простору / А. В. Федоров, Д. В. Головняк, В. А. Андрієвський, С. І. Куцмус, Ю. Ю. Галаговець // Системи управління, навігації та зв'язку : Науковий журнал. №2 (48). — Полтава, 2018. – С. 30–33.
11. Львова Л.А. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2003. С. 232.
12. Ягольников С., Нестеров С., Ковалев С. И др. Видимость "невидимок". Воздушно-космическая оборона. 2007. №3 (34). – С. 24–32.
13. Масалов С.А., Рыжак А.В., Сухаревский О.И., Шкиль В.М. Физические основы диапазонных технологий типа «Стелс». Санкт-Петербург: ВИКУ им. А.Ф.Можайского, 1999. – С. 163.
14. Чепурний В.А., Бардаков М.В., Худов Г.В. Аналіз тенденцій розвитку та застосування розвідувальних безпілотних апаратів в сучасних мережецентричних та гібридних війнах. Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. 2015. № 4 (21). – С. 24–28.

15. Мультилатераційні системи спостереження повітряного руху. Навчальний посібник. Під загальною редакцією Яковлева О.І. – К.: ДПОПР України. – С. 2010–192.
16. С.П. Лещенко. Використання інформації ADS-B в інтересах підвищення якості ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору // С.П. Лещенко, О.М. Колесник, С.А. Грицаєнко, С.І. Бурковський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХНУПС, 2017. – Вип. № 3(28). – С. 69–75.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К. С. Васюта,
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків
Received (Надійшла) 28.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

Использование системы мультилатерации для увеличения качества ведения радиолокационного контроля воздушного пространства

А. В. Федоров, В. В. Чалий, В. П. Финаев

Предметом изучения в статье является система мультилатерации (MLAT) и ее взаимодействие с существующими средствами радиолокации при ведении радиолокационного контроля (РЛК) воздушного пространства. **Целью** является анализ возможностей использования системы MLAT для повышения эффективности РЛК воздушного пространства. **Задачи:** анализ основных тенденций развития средств воздушного нападения, анализ известных организационных и технических путей повышения эффективности ведения РЛК малозаметных и малоразмерных воздушных объектов (ВО), определение направлений сочетание возможностей системы MLAT и информации от существующих радиолокационных средств, анализ возможности получения информации от системы MLAT в радиотехнических подразделениях, анализ особенностей и ограничений на использование информации от системы MLAT. Используемыми **методами** являются: методы определения координат ВО, разностно-дальномерный метод, методы пассивной радиолокации, методы определения координат ВО с использованием информации спутниковых навигационных систем. Получены следующие **результаты**. Установлено, что система MLAT является системой независимого кооперативного наблюдения, в основе работы системы MLAT положен известный дальномерный метод определения координат ВО, минимальное количество пунктов приема равно трем, получено выражение для линейной погрешности разностно-дальномерного метода в системе MLAT, установлено, что в качестве приемников в системе MLAT возможно использование транспондеров системы ADS-B, приведены несколько вариантов решения задачи по выявлению потенциально опасных ВО, желающих быть незамеченными, или осуществляют "мимикрию". **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: повышение точности определения координат ВО и качества РЛК воздушного пространства путем сочетания возможностей системы MLAT и информации от существующих радиолокационных средств; установлено, что использование системы MLAT существенно повысит точность сопровождения ВО; намечены пути оптимизации геометрической построения приемников системы MLAT на позициях радиотехнических подразделений и разработки метода совместной обработки радиолокационной информации и информации от системы MLAT при РЛК воздушного пространства.

Ключевые слова: радиолокационная станция, мультилатерация, MLAT, источник информации, воздушная обстановка, зависимое наблюдение, независимое наблюдение, воздушное пространство, контроль воздушного пространства, координаты.

The multilateration system use for increasing the quality of radar control of the air space

A. Fedorov, V. Chaliy, V. Finaev

The **subject matter** of the article is the multilateration system (MLAT) and interaction this system with modern radar facilities during radar control (RC) of airspace. The **goal** is to analyze the possibilities of the MLAT system use to improve the efficiency of the RC airspace. The **tasks** to analysis of the main trends in the development means of air attack, analysis of known organizational and technical ways to improve the efficiency of the RC airspace of low-visibility and small air objects, determination of directions for combining the capabilities of the MLAT system and information from radar equipment, analysis of the possibility of obtaining information from the MLAT system in radio departments, analysis of features and restrictions of using information from the MLAT system. The **methods** used are: methods of determining coordinates of air objects, the distance-range method, the passive radar methods, methods of determining coordinates of air objects using the information from satellite navigation systems. The following **results** were obtained. It is identified that the MLAT system is an independent co-operative observation system, the MLAT system is basis of the difference-distance-finding method for determining the coordinates of air objects, the minimum number of receiving points is equal to three, an expression for the linear error of the difference-distance-finding method in the MLAT system is established, it is established that the receivers in the MLAT system it is possible to use transponders ADS-B system, there are several variants of the decision to provide for detection of potentially dangerous air objects which wish to be unnoticed, or carry out "mimicry". **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows: to increase the accuracy of the determination of the coordinates of the air objects and the quality of RC of the airspace by combining the capabilities of the MLAT system and the information from the existing radar equipment; found that the MLAT system will use significantly increase the accuracy of air objects tracking; the ways of optimization of geometric construction of receivers of the MLAT system at the positions of the radio units and the development of method for the joint processing of radar information and information from the MLAT system at the RC of the airspace were determined.

Keywords: radars, control point, MLAT, information source, air situation, dependent observation, independent observation, airspace, airspace control, coordinates.

С. В. Гадецкая¹, В. Ю. Дубницкий², А. М. Кобылин²

¹ Национальный Технический Университет "ХПИ", Харьков, Украина

² Харьковский учебно-научный институт ГВУЗ «Университет банковского дела», Харьков, Украина

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ЭЛАСТИЧНОСТЬ ЭНТРОПИИ ШЕННОНА, ТСАЛЛИСА И РЕНЬИ

Рассмотрены функционалы, определяющие энтропии Шеннона, Тсаллиса, Реньи. Показано, что энтропии Тсаллиса и Реньи, определённые для непрерывных случайных величин, при стремлении параметра экстенсивности к единице сходятся к энтропии Шеннона. Введено понятие относительной параметрической чувствительности, определяемое эластичностью энтропии по отношению к параметрам закона распределения. Получены выражения параметрической эластичности энтропии Шеннона для нормального распределения, распределения Лапласа, распределения Коши, логистического распределения, логлогистического распределения, распределения Рэлея, экспоненциального распределения, логнормального распределения, распределения Парето, распределения Вейбулла, гамма-распределения. Получены в общем виде выражения для определения эластичности по параметру экстенсивности для энтропий Тсаллиса и Реньи. Получены в общем виде для энтропий Тсаллиса и Реньи условия для определения эластичности по одному из параметров плотности распределения.

Ключевые слова: энтропия непрерывной случайной величины, энтропия Шеннона, энтропия Тсаллиса, энтропия Реньи, эластичность функции, эластичность энтропии, энтропия нормального распределения, энтропия распределения Лапласа, энтропия распределения Коши, энтропия логистического распределения, энтропия логлогистического распределения, энтропия экспоненциального распределения, энтропия логнормального распределения, энтропия распределения Парето, энтропия распределения Вейбулла, энтропия гамма-распределения.

Введение

В работах [1, 2] было показано, что решение многих задач материаловедения, связанных с синтезом материалов с заданными свойствами, требует управления параметрами законов распределения технологических процессов получения этих свойств. Для выбора величины управляющих воздействий в этих работах рекомендовано использовать понятие эластичности функции. Формальный смысл понятия эластичности функции следующий. Эластичностью функции $f(x)$ называют предел отношения относительного изменения функции к относительному изменению аргумента. Физический смысл понятия эластичности функции следующий.

Эластичностью функции $f(x)$ показывает, на сколько процентов изменится значение функции при изменении значения аргумента на один процент, поэтому эластичность называют безразмерной чувствительностью функции по отношению к переменной или параметру. В последнем случае говорят о параметрической чувствительности.

Строгое определение этой величины дано в работе [5], свойства её описаны в работах [3, 4]. Пусть $y = f(x)$, тогда эластичность этой функции по аргументу x определяют по условию:

$$E_x(y) = \frac{dy}{dx} \cdot \frac{x}{y}. \quad (1)$$

Если $y = f(x, \lambda)$, где λ некоторый параметр, то эластичность заданной функции по параметру определяют по условию:

$$E_\lambda(y) = \frac{\partial}{\partial \lambda} f(x, \lambda) \cdot \frac{\lambda}{f(x, \lambda)}. \quad (2)$$

В работе [1] этот приём был использован при определении параметрической эластичности функции плотности распределения непрерывных случайных величин. В работе [2] этот приём был использован при определении параметрической эластичности функции интенсивности отказов, определяемой функцией распределения или функцией плотности распределения для непрерывных случайных величин.

Пусть непрерывная случайная величина X задана своей функцией распределения $F(x)$ и плотностью распределения $f(x)$. Функционал вида:

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx \quad (\text{нмт}) \quad (3)$$

называют дифференциальной энтропией Шеннона. Далее в тексте - «энтропия Шеннона».

Сведения об этом функционале для конкретных законов распределения случайных величин приведены в работе [6]. Развитие статистической физики потребовало расширения понятия энтропии. В 1988 г. в работе [7] был предложен функционал вида:

$$T(x) = k \cdot \left(1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right) / (q-1). \quad (4)$$

Условие (4) в дальнейшем получило название энтропии Тсаллиса, в других русскоязычных источниках - Цаллиса. В этом выражении величину q называют

параметром екстенсивности. В зависимости от физического смысла задачи, величина $q < 1$ или $q > 1$.

В 1970 г. в работе [8] был предложен функционал вида:

$$R(x) = k \cdot \ln \left(\int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right) / (1-q). \quad (5)$$

Условие (5) в дальнейшем получило название энтропии Реньи. Следует отметить, что общепринятые наименования единиц измерения для энтропии Тсаллиса и Реньи отсутствуют.

В условиях (4) и (5) принято, что k – постоянная величина, обеспечивающая необходимую физическую размерность результата. В нашем случае, без ограничения общности, принимаем величину $k = 1$. Особенности применения этих видов энтропии для решения физических задач описаны в работе [9]. Особенности применения энтропии Тсаллиса при анализе динамики фондовых рынков описаны в работах [10,11]. В работе [12] показано, что для дискретной случайной величины X энтропии Тсаллиса и Реньи совпадают с энтропией Шеннона.

Анализ литературы. Применение понятия эластичности функции для исследования чувствительности энтропии в доступной авторам данного сообщения литературе не обнаружено.

Постановка задачи. Определение параметрической чувствительности энтропии Шеннона, Тсаллиса и Реньи для основных видов плотностей распределения случайных величин.

Полученные результаты

Рассмотрим, используя правило Лопитала, поведение энтропии Тсаллиса при $q \rightarrow 1$:

$$\begin{aligned} \lim_{q \rightarrow 1} T(x) &= \lim_{q \rightarrow 1} \left(1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right) / (q-1) = \\ &= \frac{0}{0} = \lim_{q \rightarrow 1} \frac{-\int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q \ln f(x) dx}{1} \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно:

$$\lim_{q \rightarrow 1} T(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx. \quad (7)$$

Рассмотрим, используя правило Лопитала, поведение энтропии Реньи при $q \rightarrow 1$, имея ввиду, что $f(x)$ - функция плотности вероятности:

$$\begin{aligned} \lim_{q \rightarrow 1} R(x) &= \lim_{q \rightarrow 1} \ln \left(\int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right) / (1-q) = \\ &= \lim_{q \rightarrow 1} \frac{\int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q \ln(f(x)) dx}{-1} = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx. \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, показано, что в пределе энтропии Реньи и Тсаллиса совпадают с энтропией Шеннона.

Рассмотрим далее параметрическую эластичность энтропии Шеннона. В табл. 1 даны сведения, приведенные в работе [6], об энтропии Шеннона для использованных в данном сообщении законов распределения непрерывных случайных величин, с возможными значениями на всей числовой оси.

Таблица 1. Энтропия Шеннона распределений с возможными значениями на всей числовой оси

Вид распределения	Плотность распределения	Энтропия
Нормальное распределение	$f(x) = (\sigma\sqrt{2\pi})^{-1} \times \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$	$H = \frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma^2)$
Распределение Лапласа	$f(x) = \frac{1}{2} \lambda \exp(-\lambda x)$	$H = \ln\left(\frac{2e}{\lambda}\right)$
Распределение Коши	$f(x) = \frac{1}{\pi b \left[1 + \frac{(x-a)^2}{b^2}\right]}$	$H = \ln(4\pi b)$
Логистическое распределение	$f(x) = \frac{1}{4ch^2 \left(\frac{x-\mu}{2s}\right)^2}$	$H = \ln(se^2)$

В табл. 2 даны сведения, приведенные в работе [6], об энтропии Шеннона для использованных в данном сообщении законов распределения непрерывных случайных величин, с возможными значениями на положительной полуоси.

Таблица 2. Энтропия Шеннона распределений с возможными значениями на положительной полуоси

Вид распределения	Плотность распределения	Энтропия (нит)
Логлогистическое распределение	$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} / \left[1 + (x/\alpha)^\beta\right]^2$	$H(x) = \ln\left(\frac{\alpha}{\beta} e^2\right)$
Распределение Рэлея	$f(x) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-x^2 / (2\sigma^2)\right)$	$H(x) = \ln\left[\left(\frac{\sigma}{\sqrt{2}} \exp\left(1 + \frac{\gamma}{2}\right)\right)\right]$ $H(x) = \ln(2,5652\sigma)$
Экспоненциальное распределение	$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$	$h(x) = \ln(e/\lambda)$
Логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\left[\ln x - (\ln m)\right]^2 / (2\sigma^2)\right\}$	$H(x) = \frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma^2 m^2)$
Распределение Парето	$f(x) = cx_0^c x^{-(c+1)}$	$H(x) = \ln\left[\frac{x_0}{c} \exp\left(1 + \frac{1}{c}\right)\right]$

Окончание табл. 2

Распределение Вейбулла	$f(x) = \frac{\eta}{\sigma} \left(\frac{x}{\sigma}\right)^{\eta-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{\sigma}\right)^\eta\right]$	$H(x) = \ln\left\{\frac{\sigma}{\eta} \exp\left[1 + \left(\frac{\eta-1}{\eta}\right)\right] \gamma\right\}$
Гамма-распределение	$f(x) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} x^{\eta-1} e^{-\lambda x}$	$H(x) = \ln \Gamma(\eta) + \eta + (1-\eta)\Psi(\eta) - \ln \lambda$

Здесь и далее использованы общепринятые обозначения для специальных функций, свойства которых описаны в работе [13]. Гамма-функция:

$$\Gamma(\eta) = \int_0^\infty x^{\eta-1} e^{-x} dx; \quad (9)$$

производная гамма-функции:

$$\Gamma'(\eta) = \int_0^\infty x^{\eta-1} \ln x e^{-x} dx; \quad (10)$$

логарифмическая производная гамма-функции (дигамма-функция):

$$\Psi(\eta) = \frac{d}{d\eta} \ln \Gamma(\eta) = \frac{\Gamma'(\eta)}{\Gamma(\eta)}; \quad (11)$$

первая производная дигамма - функции (три-гамма функция):

$$\Psi'(\eta) = \frac{d}{d\eta} \Psi(\eta) = \frac{d^2}{d\eta^2} \ln \Gamma(\eta); \quad (12)$$

γ - постоянная Эйлера, $\gamma \approx 0.5772$.

Предположим, что непрерывная случайная величина X имеет плотность вероятности $f(x) = f(x, \varphi, \phi)$, где φ, ϕ – известные параметры распределения. Энтропия Шеннона для этой плотности распределения примет вид функции $H(x) = h(\varphi, \phi)$. Тогда эластичностью энтропии шеннона по параметру φ будет условие:

$$E_\varphi(H) = \frac{\partial}{\partial \varphi} h(\varphi, \phi) \cdot \frac{\varphi}{h(\varphi, \phi)}. \quad (13)$$

Результаты выполнения этой операции приведены в табл. 3.

Получение эластичности энтропии Шеннона по параметру λ для гамма-распределения очевидно. Более подробно рассмотрим получение эластичности энтропии Шеннона по параметру η для гамма-распределения В работе [4] показано, что:

$$E_x \left(\sum_{i=1}^n u_i(x) \right) = \left(x / \sum_{i=1}^n u_i(x) \right) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{d}{dx} u_i(x). \quad (14)$$

Примем, что:

$$u_1(\eta) = \ln \Gamma(\eta), \quad u_2(\eta) = \eta, \quad u_3(\eta) = (1-\eta)\Psi(\eta).$$

Далее получим, используя условия (11), (12), что:

$$\frac{du_1(\eta)}{d\eta} = \Psi(\eta); \quad \frac{du_2}{d\eta} = 1;$$

Таблица 3. Параметрическая эластичность энтропии Шеннона

Вид распределения	Параметрическая эластичность энтропии
Нормальное распределение	$E_\sigma(H) = \frac{2}{\ln(2\pi e \sigma^2)} = \frac{2}{2,8379 + 2 \ln \sigma}$
Распределение Лапласа	$E_\lambda(H) = -\left[\ln\left(\frac{2e}{\lambda}\right)\right]^{-1} = -\left[\ln\left(\frac{5,4372}{\lambda}\right)\right]^{-1}$
Распределение Коши	$E_b(H) = [\ln(4\pi b)]^{-1} = (2,5310 + \ln b)^{-1}$
Логистическое распределение	$E_s(H) = (\ln s + 2)^{-1}$
Логлогистическое распределение	$E_\alpha(H) = [\ln(\alpha/\beta) + 2]^{-1}$ $E_\beta(H) = [-\ln(\alpha/\beta) + 2]^{-1}$
Распределение Рэлея	$E_\sigma(H) = [\ln 2,5625\sigma]^{-1}$
Экспоненциальное распределение	$E_\lambda(H) = -\left[\ln\left(\left(\frac{1}{\lambda}\right) + 1\right)\right]^{-1}$
Логнормальное распределение	$E_\sigma(H) = 2/\ln(17,0795m^2\sigma^2)$ $E_m(H) = 2/\ln(17,0795m^2\sigma^2)$
Распределение Парето	$E_{x_0}(H) = \frac{c}{c \ln(x_0/c) + c + 1}$ $E_c(H) = -\frac{c + 1}{c \ln(x_0/c) + c + 1}$
Распределение Вейбулла	$E_\sigma(H) = \frac{\eta}{\eta \ln(\sigma/\eta) + \gamma(\eta-1) + \eta}$ $E_\eta(H) = \frac{\gamma - \eta}{\eta \ln(\sigma/\eta) + \gamma(\eta-1) + \eta}$
Гамма-распределение	$E_\lambda(H) = -[\ln \Gamma(\eta) + \eta + (1-\eta)\Psi(\eta) - \ln \lambda]^{-1}$ $E_\eta(H) = \frac{\eta \cdot (1 + (1-\eta)\Psi'(\eta))}{\ln \Gamma(\eta) + \eta + (1-\eta)\Psi(\eta) - \ln \lambda}$

$$\frac{du_3(\eta)}{d\eta} = -\Psi(\eta) + (1-\eta)\Psi'(\eta). \quad (15)$$

Отсюда следует, что

$$\sum_{i=1}^3 \frac{du_i(x)}{d\eta} = \Psi(\eta) + 1 - \Psi(\eta) + (1-\eta)\Psi'(\eta) = 1 + (1-\eta)\Psi'(\eta). \quad (16)$$

Следовательно, эластичность энтропии Шеннона для гамма-распределения по параметру η примет вид:

$$E_{\eta}(H) = \frac{\eta \cdot (1 + (1 - \eta) \Psi'(\eta))}{\ln \Gamma(\eta) + \eta + (1 - \eta) \Psi(\eta) - \ln \lambda}. \quad (17)$$

На рис. 1 показано изменение величины энтропии Шеннона (H) и её эластичности $E_{\sigma}(H)$ для нормального закона распределения в зависимости от изменения величины среднеквадратического отклонения σ .

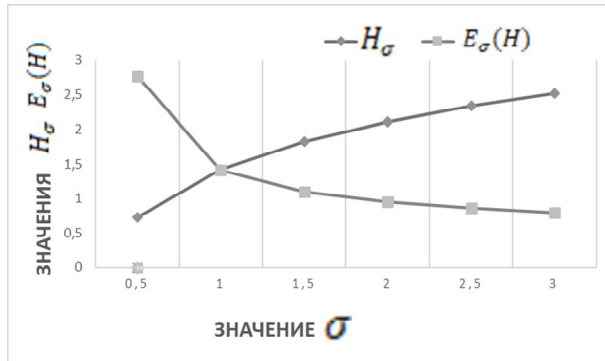


Рис. 1. Изменение величины энтропии Шеннона (H) и её эластичности $E_{\sigma}(H)$ для нормального закона распределения в зависимости от изменения величины среднеквадратического отклонения σ

На рис. 2 показано изменение эластичности распределения Вейбулла по параметру σ , величины $E_{\sigma}(H)$, в зависимости от изменения величин параметров распределения σ и η . На рис. 3 показано изменение эластичности $E_{\eta}(H)$ для закона распределения Вейбулла в зависимости от изменения параметров распределения σ и η .

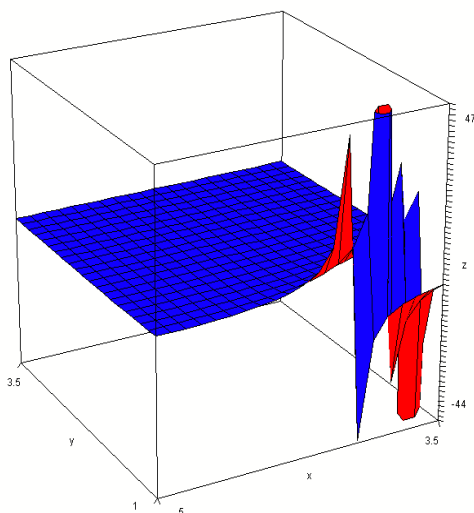


Рис. 2. Изменение величины эластичности $E_{\sigma}(H)$ для закона распределения Вейбулла, показанное на оси z в зависимости от изменения параметра σ (ось x), и параметра η (ось y)

Рассмотрим параметрическую эластичность энтропий Тсаллиса и Реньи по параметру эластичности q . Известно [14], что интегрирование интеграла вида:

$$I = \int_a^b f(x, \alpha) dx$$

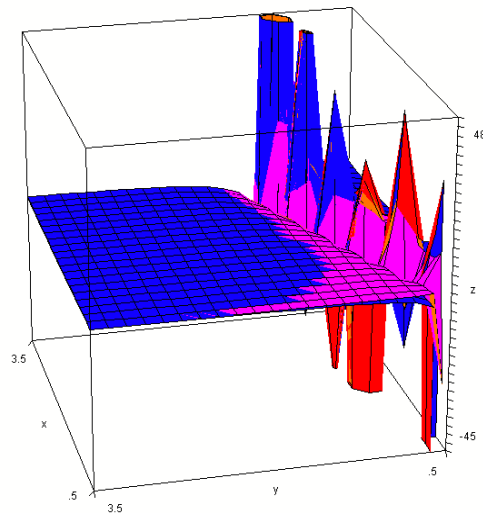


Рис. 3. Изменение величины эластичности $E_{\eta}(H)$ закона распределения Вейбулла, показанное на оси z в зависимости от изменения параметра σ , показанное на оси x , и параметра η , показанное на оси y

выполняют по правилу:

$$\frac{d}{d\alpha} \int_a^b f(x, \alpha) dx = \int_a^b \frac{\partial f(x, \alpha)}{\partial \alpha} dx. \quad (18)$$

Представим энтропию Тсаллиса, записанную в виде (4), как отношения функций:

$$u(q) = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \quad (19)$$

и
$$v(q) = q - 1, \quad (20)$$

В работе [4] показано, что если:

$$Z(x) = u(x)/v(x); \quad (21)$$

то
$$E_x(Z) = E_x(u) - E_x(v). \quad (22)$$

Для энтропии Тсаллиса примем, что:

$$u = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx; \quad (22)$$

$$v = q - 1. \quad (23)$$

Выполняя необходимые действия, указанные в условии (2), получим, что:

$$E_q(u) = \frac{\partial u}{\partial q} \cdot \frac{q}{u} = - \int_{-\infty}^{\infty} q [f(x)]^{q-1} dx \times \quad (24)$$

$$\times q / \left(1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right);$$

$$E_q(v) = q / (q - 1). \quad (25)$$

Следовательно:

$$E_q(T) = E_q(u) - E_q(v) = -q / (q - 1) - \int_{-\infty}^{\infty} q [f(x)]^{q-1} dx \cdot q / \left(1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right). \quad (26)$$

Окончательно получим, что эластичность энтропии Тсаллиса по параметру экстенсивности q равна:

$$E_q(T) = - \left\{ \frac{q^2 \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^{q-1} dx}{1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx} + \frac{q}{q-1} \right\}. \quad (27)$$

Представим энтропию Реньи, записанную в виде (5), как отношения функций:

$$u(q) = \ln \left(\int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right) \quad (28)$$

и

$$v(q) = 1 - q. \quad (29)$$

Тогда:

$$E_q(R) = \frac{\partial u}{\partial q} \cdot \frac{q}{u} = \frac{q \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^{q-1} dx}{\int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx} \cdot \frac{q}{u} = \frac{q^2 \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^{q-1} dx}{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right\}^2}; \quad (30)$$

$$E_q(v) = -\frac{q}{1-q}. \quad (31)$$

Отсюда следует, что эластичность энтропия Реньи по параметру экстенсивности q равна:

$$E_q(R) = E_q(u) - E_q(v) = \frac{q^2 \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^{q-1} dx}{\left\{ \int_{-\infty}^{\infty} [f(x)]^q dx \right\}^2} + \frac{q}{1-q}. \quad (32)$$

Предположим, без ограничения общности, что задана функция плотности вероятности вида $f(x; \lambda, \mu)$. Рассмотрим параметрическую эластичность энтропий Тсаллиса по параметру λ . Используя условия (2) и (4) получим, что:

$$E_\lambda(T) = \frac{1}{q-1} \times \frac{\left(-q \int_{-\infty}^{\infty} [f(x; \lambda, \mu)]^{q-1} \frac{\partial}{\partial \lambda} f(x; \lambda, \mu) dx \right) \lambda (q-1)}{1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x; \lambda, \mu)]^q dx}. \quad (33)$$

Окончательно получим, что эластичность энтропии Тсаллиса по параметру функции плотности распределения λ :

$$E_\lambda(T) = \frac{\left(-q\lambda \int_{-\infty}^{\infty} [f(x; \lambda, \mu)]^{q-1} \frac{\partial}{\partial \lambda} f(x; \lambda, \mu) dx \right)}{1 - \int_{-\infty}^{\infty} [f(x; \lambda, \mu)]^q dx}. \quad (34)$$

Рассмотрим параметрическую эластичность энтропий Реньи по параметру λ . Используя условия (2) и (5) получим следующее.

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} R = \frac{q \int_{-\infty}^{\infty} \left(f(x; \lambda, \mu)^{q-1} \frac{\partial}{\partial \lambda} f(x; \lambda, \mu) \right) dx}{(1-q) \left(\int_{-\infty}^{\infty} [f(x; \lambda, \mu)]^q dx \right)}. \quad (35)$$

Эластичность энтропий Реньи по параметру λ примет вид:

$$E_\lambda(R) = \frac{\partial R}{\partial \lambda} \cdot \frac{\lambda}{R} = \frac{q\lambda \int_{-\infty}^{\infty} \left(f(x; \lambda, \mu)^{q-1} \frac{\partial}{\partial \lambda} f(x; \lambda, \mu) \right) dx}{\ln \left(\int_{-\infty}^{\infty} [f(x; \lambda, \mu)]^q dx \right) \int_{-\infty}^{\infty} [f(x; \lambda, \mu)]^q dx}. \quad (37)$$

Для конкретных законов распределения условия (34) и (36) могут быть получены численными методами.

Выводы

1. Рассмотрены функционалы, определяющие энтропии Шеннона, Тсаллиса, Реньи.
2. Показано, что энтропии Тсаллиса и Реньи, определённые для непрерывных случайных величин, при стремлении параметра экстенсивности к единице сходятся к энтропии Шеннона.
3. Введено понятие относительной параметрической чувствительности, определяемое эластичностью энтропии по отношению к параметрам закона распределения.
4. Получены выражения параметрической эластичности энтропии Шеннона для нормального распределения, распределения Лапласа, распределения Коши, логистического распределения, логлогистического распределения, распределение Рэлея, экспоненциального распределения, логнормального распределения, распределения Парето, распределения Вейбулла, гамма-распределения.
5. Получены в общем виде выражения для определения эластичности по параметру экстенсивности для энтропий Тсаллиса и Реньи.
6. Получены в общем виде для энтропий Тсаллиса и Реньи условия для определения эластичности по одному из параметров плотности распределения

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дубницький В. Ю. Управление функцией распределения случайной величины [Текст] / В. Ю. Дубницький, А. И. Ходырев // Системи обробки інформації. –Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 5(95). – С. 147-151.
2. Дубницький В. Ю. Управление интенсивностью отказов положительно определённых случайных величин / В. Ю. Дубницький, О. Е. Петренко // Системи обробки інформації. Харків: ХУПС, 2017. – Вип. 3(149). – С. 33-37.
3. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / под ред. А. А. Красовского. – Москва: Наука, 1987. – 712 с.
4. Солодовников А. С. Математика в экономике: в 2-х частях [Текст] / А. С. Солодовников, В. А. Бабайцев, А. В. Браилов, И. Г. Шандура. Ч.2. – Москва: Финансы и статистика, 2000. – 376 с.
5. Рывкин А. А. Эластичность [Текст] / А. А. Рывкин // Экономико-математический энциклопедический словарь. Гл. редактор В. И. Данилов-Данильяни. – Москва: Изд. Большая Российская энциклопедия, 2003. – С. 649.
7. Michlowicz J. V. Handbook of DIFFERENTIAL ENTROPY / J. V. Michlowicz, J. M. Nichols, F. Bucholtz. – New York: A.CHAPMAN & HALL, 2014. – 220 p.
8. Tsallis C. Possible Generalization of Boltzmann-Gibbs-Statistics // J. Stat. Phys. 1988. Vol.52. N1/2. P.479-487; a regular updated bibliography is accessible at [http://tsallis. cat.cbpf.br/biblio.htm](http://tsallis.cat.cbpf.br/biblio.htm).
9. Renyi A. Probability Theory. / A. Renyi- Amsterdam: North-Holland Publ. Co., 1970. – 573 p.
10. Зарипов Р. Г. Самоорганизация и необратимость в неэкстенсивных системах. / Р. Г. Зарипов. – Казань: Изд-во «Фэн», 2002. – 251 с.
11. Королёв О. Л. Применение энтропии при моделировании процессов принятия решений в экономике / О. Л. Королёв, М. Ю. Кусый, А. В. Сигал / Под ред. А. В. Сигала. - Симферополь: Издательство «ОДЖАКЪ», 2013. – 148 с.
12. Дербенцев В. Д. Синергетичні та економічні методи дослідження структурних характеристик економічних систем. / В. Д. Дербенцев, О. А. Сердюк, В. М. Соловйов, О. Д. Шапаров. Черкаси: Брама-Україна, 2010. – 287 с.
13. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных / О. В. Чумак. Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.
14. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами. / Под ред. М. Абрамовица и И. Стигана. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
15. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.2 / Г. М. Фихтенгольц. – Москва: ФИЗМАТГИЗ, 1962. – 807 с.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. О. Можасв,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 14.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 21.04.2018

Параметрична еластичність ентропії Шеннона, Тсалліса та Реньї

С. В. Гадецька, В. Ю. Дубницький, А. М. Кобилін

Розглянуто функціонали, що визначають ентропії Шеннона, Тсалліса, Реньї. Показано, що ентропії Тсалліса і Реньї визначені для неперервних випадкових величин, при наближенні параметра екстенсивності до одиниці збігаються до ентропії Шеннона. Введено поняття відносної параметричної чутливості, визначене еластичністю ентропії по відношенню до параметрів закону розподілу. Отримано вирази параметричної еластичності ентропії Шеннона для нормального розподілу, розподілу Лапласа, розподілу Коші, логістичного розподілу, логлогістичного розподілу, розподілу Релея, експоненціального розподілу, логнормального розподілу, розподілу Парето, розподілу Вейбулла, гамма-розподілу. Отримано в загальному вигляді вирази для визначення еластичності по параметру екстенсивності для ентропій Тсалліса і Реньї. Отримано у загальному вигляді для ентропій Тсалліса і Реньї умови для визначення еластичності по одному з параметрів щільності розподілу.

Ключові слова: ентропія неперервної випадкової величини, ентропія Шеннона, ентропія Тсалліса, ентропія Реньї, еластичність функцій, еластичність ентропії, ентропія нормального розподілу, ентропія розподілу Лапласа, ентропія розподілу Коші, ентропія логістичного розподілу, ентропія логлогістичного розподілу, ентропія розподілу Релея, ентропія експоненціального розподілу, ентропія логнормального розподілу, ентропія розподілу Парето, ентропія розподілу Вейбулла, ентропія гамма-розподілу.

Parametric elasticity of entropy of Shannon, Tsallis and Renyi

S. Gadetska, V. Dubnitskiy, A. Kobulin

The functionals defining the entropies of Shannon, Tsallis, Renyi are considered. It is shown that the entropies of Tsallis and Renyi, defined for continuous random variables, approach the Shannon entropy as the parameter of extensiveness approaches unity. The concept of relative parametric sensitivity, defined by the elasticity of entropy with respect to the parameters of the distribution law, is introduced. The expressions for the parametric elasticity of the Shannon entropy for the normal distribution, Laplace distribution, Cauchy distribution, logistic distribution, loglogistic distribution, Rayleigh distribution, exponential distribution, lognormal distribution, Pareto distribution, Weibull distribution, gamma distribution are obtained. The general expressions for determining the elasticity with respect to the extensivity parameter for the entropies of Tsallis and Renyi are obtained. The general conditions for determining the elasticity for the entropies of Tsallis and Renyi with respect to one of the parameters of the distribution density are obtained.

Keywords: entropy of a continuous random variable, Shannon entropy, Tsallis entropy, Renyi entropy, elasticity of function, elasticity of entropy, normal distribution entropy, entropy of the Laplace distribution, entropy of the Cauchy distribution, entropy of the logistic distribution, entropy of the loglogistic distribution, entropy of the Rayleigh distribution, entropy of the exponential distribution, entropy of the lognormal distribution, entropy of the Pareto distribution, entropy of the Weibull distribution, entropy of the gamma distribution

И. В. Гребенник, О. С. Черная, Е. Е. Макарова

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ НА МНОЖЕСТВЕ ЦИКЛИЧЕСКИХ ПЕРЕСТАНОВОК С ЛИНЕЙНЫМИ ОГРАНИЧЕНИЯМИ

Предметом статьи является процесс решения задач дискретной оптимизации на комбинаторных множествах различных классов. **Целью** является разработка методов решения задачи оптимизации линейной функции с линейными ограничениями на множестве циклических перестановок, погруженном в евклидово пространство. **Задачи:** найти точное или приближенное решение задачи оптимизации линейной функции с линейными ограничениями на множестве циклических перестановок, погруженном в евклидово пространство. Исследовать свойства задачи оптимизации, оценить приближенное решение. Основные **результаты** работы. Предложена стратегия решения с использованием алгоритма на основе случайного поиска. Для решения задачи оптимизации линейной функции на множестве циклических перестановок используется подход, основанный на идеологии случайного поиска и аналитическом решении систем линейных неравенств, описывающих ограничения задачи. В процессе решения исходной задачи необходимо многократное решение вспомогательной задачи оптимизации линейной функции на множестве циклических перестановок без ограничений. В работе приводится два подхода к решению вспомогательной задачи. Первый подход позволяет получить точное решение вспомогательной задачи методом ветвей и границ или приближенное решение при использовании дополнительных эвристик с оценкой полученного решения. Вторым подходом – эвристический метод на основе транспозиций специального вида. Для реализации подхода введен класс транспозиций, представители которого соответствуют критерию смежности в перестановочном многограннике. Предложенные стратегии реализованы программно и протестированы на задачах различной размерности с исходными данными, генерируемыми случайным образом. Проведены вычислительные эксперименты с целью сравнения точности и времени решения исходной задачи методом случайного поиска с использованием предложенных подходов к решению вспомогательной задачи. **Выводы.** Эксперименты показывают преимущество решения вспомогательной задачи методом ветвей и границ на малых размерностях. При этом на задачах больших размерностей метод на основе транспозиций существенно выигрывает в плане экономии вычислительных мощностей.

Ключевые слова комбинаторная оптимизация, линейная функция, линейные ограничения, аналитическое решение системы линейных неравенств, циклические перестановки, случайный поиск, транспозиции.

Введение

Широкая популярность задач линейной и дискретной оптимизации обусловлена использованием математических моделей этих задач для описания многих фундаментальных и прикладных явлений. В частности ряд популярных задач геометрического проектирования и управления может быть описан различными комбинаторными оптимизационными моделями [1 – 4]. Математические модели таких задач сводятся к соответствующим классам задач комбинаторной оптимизации линейных функций. Области допустимых решений в математических моделях задач геометрического проектирования с дискретными параметрами часто представляются классическими комбинаторными множествами, среди которых множества перестановок, сочетаний, размещений и другие.

Дополнительные линейные ограничения на переменные в таких задачах позволяют выделить следующие известные в литературе классы множеств перестановок: перестановки различных элементов P_n , перестановки с повторениями, перестановки из n элементов, k из которых различны P_{nk} , циклические перестановки P_n^C , перестановки кортежей PT_{nk}^m , композиции перестановок PW_n , перестановки содержащие (не содержащие) шаблон (pattern), полиперестановки и другие [1, 4, 5, 6]. Существующие подходы к решению задач оптимизации на

комбинаторных множествах делятся на две основные группы: методы отсечения и комбинаторные методы. Одним из наиболее распространенных точных комбинаторных методов является метод ветвей и границ, а для решения задач комбинаторной оптимизации большой размерности часто используют методы, основанные на случайном поиске.

Исследование и использование свойств комбинаторных объектов повышает эффективность процессов моделирования и решения задач, имеющих комбинаторную структуру, в частности, задач комбинаторной генерации и комбинаторной оптимизации. Известен способ исследования комбинаторных множеств, основанный на их погружении в евклидово пространство [3, 4]. Тогда выпуклая оболочка образа комбинаторного множества, полученная в результате погружения, представляет собой комбинаторный, в частности, перестановочный, многогранник. Для некоторых подмножеств множества перестановок при погружении в евклидово пространство, на данный момент не описаны соответствующие комбинаторные многогранники. Поэтому при решении задач на этих множествах предлагается использовать перестановочный многогранник, но исследовать те его вершины, которые соответствуют элементам заданного подмножества множества перестановок. Такой подход позволяет воспользоваться одним из базовых свойств перестановочного многогранника – критерием смежности его вершин [7].

В данной работе для решения задач оптимизации на множестве циклических перестановок реали-

зуються ідеологія випадкового на основі використання властивостей циклічних перестановок, транспозицій і аналітичного рішення систем лінійних нерівностей як обмежень на змінні.

Цілью статті являється рішення задач оптимізації лінійних функцій на множині циклічних перестановок з лінійними обмеженнями.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Определение [8]. Лінійне упорядочення елементів деякого породжуючого множини $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ називається перестановкою $\pi = \pi(a_1, \dots, a_n) = (\pi(a_1), \pi(a_2), \dots, \pi(a_n)) = (a_{i_1}, \dots, a_{i_n})$, або, якщо необхідно підкреслити той факт, що вона містить n елементів, n -перестановкою. Множество перестановок, породжене елементами $a_1 < a_2 < \dots < a_n$, позначимо P_n^C .

Кожний елемент множини $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ зустрічається в єдиному циклі перестановки π , і можливо розглядати π як об'єднання непересекаючихся циклів, або по-іншому, як проіздеження різних циклів C_1, \dots, C_k , записуючи в вигляді $\pi = C_1, \dots, C_k$.

Розглянемо деяку перестановку $\pi = (\pi(a_1), \pi(a_2), \dots, \pi(a_n)) \in P_n$, і її елемент $\pi(a_j) = a_j$, $\forall j, j \in J_n$. Тоді можна записати: $\pi(a_j) = \pi(\pi(a_j)) = \pi^2(a_j)$. Загальною можна цю формулу представити в такому вигляді: $\pi^{k-1}(a_j) = \pi(\pi^{k-1}(a_j)) = \pi^k(a_j)$, $\forall j, j \in J_n$, $k \leq n$.

Таким чином [8], якщо для деякого $l \geq 1$ маємо $\pi^l(a_i) = a_i$, $i \in J_n$, і елементи $a_i, \pi(a_i), \pi^2(a_i), \dots, \pi^{l-1}(a_i)$ всі різні, то послідовність $(a_i, \pi(a_i), \pi^2(a_i), \dots, \pi^{l-1}(a_i))$ називається циклом довжини l .

Определение [9]. Циклічною перестановкою називається така перестановка π з n елементів, яка містить єдиний цикл довжини n , тобто $\pi^n(a_i) = a_i$, $\forall i \in J_n$. Такі перестановки будемо позначати π_C . Тоді P_n^C – множина циклічних перестановок π_C [8, 13].

Звернемо увагу, що множини перестановок P_n і циклічних перестановок P_n^C є евклідовими комбінаторними множинами, або е-множинами.

Позначимо $E_n^C = f(P_n^C)$ образ множини циклічних перестановок P_n^C при зануренні в евклідове простір [3, 4, 12]. Здійснимо зображення множин перестановок P_n і циклічних перестановок P_n^C в арифметичне евклідове простір R^n . Зазначене зображення (називається зануренням) задамо в вигляді:

$$f: P \rightarrow R^n, \forall p = (p_1, p_2, \dots, p_n) \in P, \quad (1)$$

$$x = f(p) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in E \subset R^n,$$

$$x_i = p_i, i \in J_n.$$

В результаті занурення f кожному множині P_n , P_n^C поставимо в взаємозв'язок відповідно множині $E \subset R^n$: $E_n = f(P_n)$, $E_n^C = f(P_n^C)$.

Після занурення множини $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ буде породжено багатогранник Π_n , де $\text{vert } \Pi_n = E_n$ – його множина вершин.

При розв'язанні задач на комбінаторних множинах пропонується використовувати перестановочний багатогранник і дослідити те його вершини, які відповідають елементам заданого підмножини множини перестановок. Одним з базових властивостей перестановочного багатогранника є критерій сусідності його вершин [10].

Так як між множини породжуючих елементів $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ і множини їх індексів $J = \{1, 2, \dots, n\}$ існує взаємозв'язок, далі, без втрати загальності, будемо розглядати множину перестановок P_n , породжену елементами $\{1, 2, \dots, n\}$, тобто, $A = J_n$.

Розглянемо функцію σ_i на множині породжуючих елементів, $\sigma_i: A \rightarrow A$, визначену наступним чином:

$$\sigma(1) = 1, \sigma(2) = 2, \dots, \sigma(i) = i + 1,$$

$$\sigma(i + 1) = i, \dots, \sigma(n) = n, \quad (2)$$

де $i \in J_{n-1}$. Функція, визначена таким чином, є бієктивною і представляє собою транспозицію елементів $\{i, i + 1\} \subset A$ [9].

Властивістю функції σ_i , заданою в вигляді (2), є те, що вона відповідає критерію сусідності перестановочного багатогранника Π_n . В результаті застосування функції $\sigma_i(p)$ до довільної перестановки $p \in P_n$ буде отримано перестановку p_k , така що відповідні p і p_k вершини перестановочного багатогранника є сусідніми.

Для будь-якої вершини $v \in \text{vert } \Pi_n$ транспозицію $\sigma_i(v)$ виду (2) елементів $\{i, i + 1\}$, належачих одному циклу довжини k відповідної перестановки $p \in P_n$, будемо називати транспозицією розриву. А транспозицію елементів $\{i, i + 1\}$, належачих двом різним циклам довжини k_1 і k_2 – транспозицією з'єднання. Назвемо дві транспози-

ции σ_i и σ_j непересекающимися, если подмножества элементов $\{i, i+1\}$ и $\{j, j+1\}$, соответствующие каждой из транспозиций, не пересекаются. Если подмножества $\{i, i+1\}$ и $\{j, j+1\}$, соответствующие двум транспозициям σ_i и σ_j , пересекаются и $i+1 = j$ или $i = j+1$, то такие транспозиции будем называть пересекающимися [11].

Постановка задачи

Исследуем задачу комбинаторной оптимизации в следующей постановке:

$$L(p) = \alpha_i p_i \rightarrow \min ; \quad (3)$$

$$Cp \leq d ; \quad (4)$$

$$p \in \bar{P} \in \{P_n, P_{nk}, P_n^C, PW_n, P_{nk}^m\}, \quad (5)$$

где $C = [C_{ij}]_{m \times n}$, $d \in R^n$, $\alpha_i \in R$, $p_i \in J_n = \{1, \dots, n\}$, $i \in J_n$, $\forall i, j$, $p_i \neq p_j$;

$$\bar{P} \in \{P_n, P_{nk}, P_n^C, PW_n, P_{nk}^m\},$$

где P_n – множество перестановок различных элементов, P_{nk} – множество перестановок из n элементов, k из которых различны, P_n^C – множество циклических перестановок, P_{nk}^m – множество перестановок кортежей, PW_n – множество композиции перестановок.

В данной работе далее из множества $\{P_n, P_{nk}, P_n^C, PW_n, P_{nk}^m\}$ выберем множество циклических перестановок, то есть $\bar{P} = P_n^C$. Таким образом, задача состоит в следующем: минимизировать линейную функцию с линейными ограничениями на множестве циклических перестановок.

Используя погружение комбинаторного множества циклических перестановок P_n^C в евклидово пространство (1), сформулируем эквивалентную задачу оптимизации:

$$L(x) = \alpha_i x_i \rightarrow \min ; \quad (6)$$

$$Cx \leq d ; \quad (7)$$

$$x \in E_n^C \subset R^n, \quad (8)$$

где $C = [C_{ij}]_{m \times n}$, $d \in R^n$, $\alpha_i \in R$, $x_i \geq 0$, E_n^C – образ множества циклических перестановок в евклидовом пространстве.

Решение задачи на основе стратегии случайного поиска и метода ветвей и границ

Для решения задачи оптимизации линейной функции на множестве циклических перестановок используем подход, основанный на идеологии слу-

чайного поиска и аналитическом решении систем линейных неравенств, описывающих ограничения задачи. Основа данного подхода была заложена в работе [14] для решения задачи оптимизации линейной функции на множестве перестановок P_n с линейными ограничениями.

В дальнейших работах была предложена модификация этого метода для решения задачи (6)–(8). Для этого, согласно [14], формируется эквивалентная задача:

$$L(x) = \alpha_i x_i \rightarrow \min ; \quad (9)$$

$$W^0 x \leq v^0 ; \quad (10)$$

$$x_i \geq 0, x \in E_n^C \subset R^n, x \in E_n^C \subset R^n, \quad (11)$$

при решении которой x_i находится таким образом:

$$x_i = \arg \min_{x \in E_n^C} \|x - z(i)\|^2. \quad (12)$$

Для множества перестановок E_n нахождение x_i вида (12) сводится к нахождению безусловного минимума линейной функции:

$$x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = \arg \min_{x \in E_n^C} \sum_{j=1}^n \alpha_j x_j. \quad (13)$$

Поскольку множество циклических перестановок является подмножеством множества перестановок, то для любого $x \in E_n^C$ задача (12) так же сводится к оптимизации линейной функции. Для множества E_n^C задача (13) не может быть решена на основе упорядочения элементов, и её было предложено решать с помощью метода ветвей и границ [9]. Кроме метода ветвей и границ далее будет предложен альтернативный метод решения задачи (13) с использованием транспозиций особого вида (2).

Решение вспомогательной задачи на основе свойств транспозиций специального вида

Использование метода ветвей и границ для вспомогательной задачи имеет свои недостатки. Данный метод существенно зависит от исходных данных и при решении задач размерности больше 20 требует задействования вычислительных ресурсов не соизмеримых с получаемой выгодой.

В работе [11] для решения вспомогательной задачи вида (13) была предложена стратегия на основе свойств транспозиций вида (2). Данный алгоритм позволяет получать приближенное решение задачи, но при этом не требует существенных вычислительных ресурсов. Для этого находим перестановку $p^* \in P_n$, такую что

$$p^* = \arg \min_{p \in P_n} \sum_{j=1}^n \alpha_j p_j.$$

Тогда, если $p^* \in P_n^C$, то решение задачи (13) найдено. В противном случае – необходимо разбиение данной перестановки в произведение циклов. Для этого производится подсчет количества циклов k , из которых состоит исходная перестановка. Далее выбираются из всех возможных $n-1$ транспозиций вида (2), $k-1$ транспозиций соединения, таких чтобы с их помощью можно было объединить все k циклов.

Подсчет различных перестановок, которые можно породить с помощью данных транспозиций, путем применения к перестановке $p^* \in P_n$ выбранных транспозиций, учитывая соотношение пересекающихся и непересекающихся. Далее происходит генерация перестановок и подсчет значения функции цели. В качестве приближенного решения исходной задачи принимается перестановка с минимальным значением целевой функции. В качестве последнего этапа решения исходной задачи осуществляется оценка полученного решения.

В данной работе предлагается модификация метода на основе случайного поиска, при которой решение вспомогательной задачи вида (12) производится с помощью описанного алгоритма, использующего транспозиции вида (2).

Вычислительные эксперименты

Изложенная стратегия оптимизации линейных функций на циклических перестановках без ограничений реализована программно, проведены вычислительные эксперименты по решению задач вида (6)–(8). Случайным образом генерировались исходные данные задач: коэффициенты функции цели и ограничений, порождающие элементы комбинаторного множества.

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе решались задачи до 8 переменных, модификацией метода случайного поиска при которой вспомогательная задача решалась с помощью транспозиций порождающих элементов. Далее полученные приближенные решения задачи (6)–(8) сравнивались с решениями, полученными полным перебором.

Случайным образом генерировались коэффициенты двух линейных ограничений, и коэффициенты целевой функции. Коэффициенты целевой функции генерировались в интервале $[-200, 200]$.

Для нахождения решения использовалось количество серий, равное 5, каждая серия состояла из 10 экспериментальных точек. Рассчитывалась относительная погрешность для задач, в которых результаты решения разработанным методом и методом полного перебора не совпадают. Полученные результаты представлены в табл. 1. Для обозначений выберем следующие сокращения: N – размерность задачи, S_M – число совпавших решений, $S_{\overline{M}}$ – число не совпавших решений, $AVG(\Delta)$ – относительная погрешность результатов, T – среднее время решения, секунды.

Таблица 1. Результаты решения задач до 8 переменных

N	S_M	$S_{\overline{M}}$	$AVG(\Delta)$	T
3	9	1	0,125	0,173
4	10	0	0	0,331
5	9	1	0,750	0,989
6	10	0	0	1,326
7	5	5	0,714	3,512
8	5	5	0,833	4,898

Проведем сравнительную оценку значений, полученных методом случайного поиска и метода ветвей и границ (СП+МВГ) со значениями, полученными методом случайного поиска на основе свойств транспозиций (СП+Т). Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительная оценка значений до 8 переменных

N	СП + МВГ		СП + Т	
	$AVG(\Delta)$	T	$AVG(\Delta)$	T
3	0	0,14	0,125	0,173
4	0,077	0,269	0	0,331
5	0,128	0,439	0,750	0,989
6	0,072	0,734	0	1,326
7	0,084	1,527	0,714	3,512
8	0,134	3,402	0,833	4,898

Обозначим через $AVG(\Delta)$ – относительную погрешность решения.

Исходя из результатов, представленных в табл. 2 можно сделать вывод о том, что задачу оптимизации линейной функции на множестве циклических перестановок на малых размерностях лучше решать методом случайного поиска и методом ветвей и границ. В таком случае при незначительном росте времени вычислений наблюдается так же незначительный рост погрешности. В то время как модификация метода случайного поиска с применением транспозиций показывает относительную погрешность в 8-10 раз большую при соизмеримом времени вычислений.

На втором этапе решались задачи большей размерности. В таких задачах для получения нижней оценки минимума вычислялась две оценки [9] следующего вида:

$$E_1 = \left| \frac{Est - Rnd}{Rnd} \right|$$

и

$$E_2 = \left| \frac{Est - Rnd}{Est} \right|,$$

где Est – минимум функции цели на циклических перестановках без учета линейных ограничений а Rnd – результат решения задачи методом случайного поиска.

Результаты соответствующих вычислительных экспериментов приведены в табл. 3. Для размерности выше 15 было решено K задач со случайными входными данными.

Таблица 3. Результаты решения задачи размерности 15-30

N	K	$AVG(E_1)$	$AVG(E_2)$	T
15	10	0,259	0,369	15,24
20	10	0,454	1,571	48,86
30	5	0,379	0,718	163,9

Отметим, что с ростом размерности задачи при фиксированном количестве экспериментов характеристики полученного решения ухудшаются. Повышения точности можно добиться путем увеличения количества серий и числа экспериментов в каждой серии.

Сравнительная оценка результатов, полученных методом случайного поиска и методом ветвей и границ со значениями, полученными модификацией метода случайного поиска на основе свойств транспозиций на больших размерностях представлена в табл. 4.

Таблица 4. Сравнительная оценка результатов

N	СП + МВГ			СП + Т		
	$AVG(E_1)$	$AVG(E_2)$	T	$AVG(E_1)$	$AVG(E_2)$	T
15	0,256	0,255	18,19	0,259	0,369	15,24
20	0,127	0,122	225,9	0,454	1,571	48,8
30	0,227	0,308	1805,8	0,379	0,718	163

Исходя из результатов, представленных в табл. 2 и в табл. 4, можно сделать вывод, что на малых размерностях относительная погрешность и среднее время решения модификацией метода случайного поиска на основе свойств транспозиций больше, чем методом случайного поиска и методом ветвей и границ.

На задачах большей размерности, следует отметить, противоположный результат. Это связано с тем, что применение метода ветвей и границ приводит к экспоненциальному росту трудоемкости при увеличении размерности задачи. Кроме того, наблюдается существенная зависимость трудоемкости решения, как от способа ветвления, так и от способа вычисления оценок.

Следует отметить, что метод случайного поиска и метод ветвей и границ при текущих вычислительных мощностях не позволяет решать задачи размерности более 30, чего нельзя сказать о модификации метода случайного поиска на основе свойств транспозиций.

Результаты решения задач соответствующих размерностей представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты решения задач больших размерностей

N	K	$AVG(E_1)$	$AVG(E_2)$	T
35	2	1,602	2,661	143,5
40	1	0,278	0,385	896,9
45	1	0,891	8,203	325,6

Выводы

В данной работе реализована стратегия решения задачи оптимизации линейной функции на множестве циклических перестановок, погруженном в евклидово пространство, на основе схемы случайного поиска. Предложены две модификации подхода. Одна из них предполагает нахождение точного решения вспомогательной задачи с помощью метода ветвей и границ. Во второй модификации для вспомогательной задачи находится приближенное решение на основании свойств транспозиций порождающих элементов в перестановках и особенностей комбинаторного множества перестановок. Для реализации подхода введен класс транспозиций, представители которого соответствуют критерию смежности в перестановочном многограннике.

Предложенные стратегии реализованы программно и протестированы на задачах различной размерности с исходными данными, генерируемыми случайным образом. Из результатов вычислительных экспериментов можно сделать вывод что решение задачи оптимизации линейной функции на множестве циклических перестановок с помощью модификации метода случайного поиска на основе свойств транспозиций порождающих элементов выгодно применять для решения задач размерности $N \geq 15$. В таком случае временные затраты на поиск решения существенно ниже чем при решении аналогичных задач методом случайного поиска и методом ветвей и границ. А относительная погрешность существенно не отличается.

Необходимо отметить, что модификация метода случайного поиска на основе свойств транспозиций при решении задач размерности $N > 30$ позволяет получить некоторое приближенное решение, в то время как метод ветвей и границ при имеющихся вычислительных мощностях не дает решения задач такой размерности.

Предложенные в данной статье методы могут использоваться для решения задач комбинаторной оптимизации, как на классических комбинаторных множествах, так и на композиционных образах комбинаторных множеств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сергиенко И. В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации / И. В. Сергиенко – К.: Наук. думка, 1988. – 472 с.
2. Емец О. А. Комбинаторная оптимизация на размещениях / О. А. Емец, Т. Н. Барболина. – К.: Наук. думка, 2008. – 159 с.
3. Стоян Ю. Г. Теорія і методи евклідової комбінаторної оптимізації / Ю. Г. Стоян, О. О. Ємець – К.: Інститут системних досліджень освіти, 1993. – 188 с.
4. Стоян Ю. Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования / Ю. Г. Стоян, С. В. Яковлев – К.: Наук. думка, 1986. – 268 с.

5. Гребенник И. В. Упорядочение перестановок при решении задач комбинаторной оптимизации с линейной целевой функцией / И. В. Гребенник, Л. Ю. Юрченко // Системи обробки інформації.– Х.: ХУПС, 2007. – Вип. 8 (66).– С. 139-142.
6. Гребенник И. В. Решение некоторых задач условной оптимизации линейных функций на перестановочном многограннике. / И. В. Гребенник // Радиоэлектроника и информатика.– 1999.– № 1.– С. 55-59.
7. Емеличев В. А. Многогранники, графы, оптимизация. / В. А. Емеличев, М. М. Ковалев, М. К. Кравцов. – М.: Наука, 1981. – 344 с.
8. Стенли Р. Перечислительная комбинаторика / Р. Стенли; пер. с англ. А. И. Барвинка. – М.: Мир, 1990. – 440 с.
9. Гребенник И. В. Оптимизация линейной функции на множестве циклических перестановок / И. В. Гребенник, А. С. Литвиненко, О. С. Титова. – Бионика Интеллекта. – 2012. – № 2 (79). – С. 8-12.
10. Емец О. А. Решение линейных задач оптимизации на размещении методом отсечения / О. А. Емец, Т. Н. Барболина // Кибернетика и системный анализ. – 2003. – Т. 37, № 6.
11. Гребенник И. В. Специальные транспозиции элементов перестановок и свойства композиции / И. В. Гребенник, О. С. Черная // Кибернетика и системный анализ.– 2017.– Т. 53, № 1. – С. 79-90..
12. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел; пер. с англ. В. Я. Алтаева. – М.: Мир, 1986. – 348 с.
13. Bona M. Combinatorics of permutations / M. Bona. – Chapman & Hall/CRC, 2004. – 337 с.
14. Гребенник И. В. Оптимизация линейных функций с линейными ограничениями на комбинаторных множествах на основе случайного поиска / И. В. Гребенник, А. В. Баранов // Искусств. интеллект. – 2007. – № 1.– С. 132-137.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. О. Можасьв,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 21.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.04.2018

Оптимізація лінійних функцій на множині циклічних перестановок з лінійними обмеженнями

І. В. Гребеннік, О. С. Чорна, О. Є. Макарова

Дана робота присвячена рішенням завдань лінійної і дискретної оптимізації на різних класах комбінаторних множин. Зокрема в роботі описано рішення задачі оптимізації лінійної функції з лінійними обмеженнями на множині циклічних перестановок. Це стратегія рішення з використанням алгоритму на основі випадкового пошуку. Для рішення задачі оптимізації лінійної функції на множині циклічних перестановок використано підхід, заснований на ідеології випадкового пошуку і аналітичному рішенні систем лінійних нерівностей, що описують обмеження задачі. У процесі рішення вихідної задачі виникає необхідність багаторазового рішення додаткової задачі лінійної оптимізації на множині циклічних перестановок без обмежень. У роботі наводяться два варіанти рішення додаткової задачі. Перший алгоритм на основі методу гілок і меж. Описано переваги такого підходу - можливість отримати точне рішення, різні варіації методу розгалуження дозволяють гнучко управляти витратами обчислювальних потужностей. Так само в роботі приведена альтернатива методу гілок і меж - евристичний метод на основі транспозицій особливого виду. Для цього було розглянуто клас транспозицій, що характеризується тим, що транспозиції з даного класу відповідають критерію суміжності в переставному багатограннику. Запропоновані стратегії реалізовані програмно і протестовані на завданнях різної розмірності з вихідними даними, що генеруються випадковим чином. Проведено обчислювальні експерименти для порівняння точності і часу рішення вихідної задачі двома варіантами методу випадкового пошуку. Експерименти показують перевагу рішення додаткової задачі методом гілок і меж на малих розмірностях. При цьому на завданнях великих розмірностей метод на основі транспозицій особливого виду істотно виграє в плані економії обчислювальних потужностей.

Ключові слова: комбінаторна оптимізація, лінійна функція, перестановки, циклічні перестановки, випадковий пошук, транспозиції.

Optimization of linear functions on a set of cyclic permutations with linear constraints

I. Grebennik, O. Chernaya, E. Makarova

This paper is devoted to the solution of problems of linear and discrete optimization on various classes of combinatorial sets. In particular, the paper describes the solution of the optimization problem for a linear function with linear constraints on the set of cyclic permutations. A decision strategy is described using an algorithm based on random search. To solve the problem of optimizing a linear function on the set of cyclic permutations, we use the approach based on the ideology of random search and the analytical solution of systems of linear inequalities describing the constraints of the problem. In the process of solving the initial problem, it becomes necessary to solve the additional problem of linear optimization multiple times on a set of cyclic permutations without restrictions. The paper presents two options for solving the auxiliary problem. The first algorithm is based on the branch and bound method. Advantages of this approach are - the ability to obtain an exact solution, various variations of the branching method allow flexibly manage the computational costs. An alternative to the branch and bound method is also given in the work - a heuristic method based on transpositions of a special kind. To do this, we considered a class of transpositions characterized by the fact that transpositions from a given class correspond to the adjacency criterion in a permutation polyhedron. The proposed strategies are implemented and tested on problems of different dimensions with initial data generated randomly. Computational experiments have been performed to compare the accuracy and time of the solution of the original problem by two variations of the random search method. Experiments show the advantage of solving an auxiliary problem by the branch and bound method on small dimensions. In large-scale problems, the method based on transpositions of a special kind significantly benefits in terms of saving computational costs.

Keywords: combinatorial optimization, linear function, permutations, cyclic permutations, random search, transpositions.

В. А. Лещинский, И. А. Лещинская

Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА КОЛАБОРАТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С НЕЯВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА ОСНОВЕ РАНЖИРОВАНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ В МАТРИЦЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Предметом изучения в статье являются процессы выявления предпочтений пользователей в рекомендательных системах. **Целью** является разработка усовершенствованного метода коллаборативной фильтрации на основе ранжирования пропущенных и отрицательных результатов в матрице исходных данных. **Задачи:** Формализовать свойства исходных данных, включая пропущенные данные для задачи коллаборативной фильтрации; разработать подход к ранжированию исходных данных для коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью, включая пропущенные и отрицательные результаты; усовершенствовать метод коллаборативной фильтрации путем предварительного ранжирования пропущенных и отрицательных результатов в исходных данных. Используемыми **методами** являются: коллаборативная фильтрация, машинное обучение. Получены следующие **результаты.** Формализованы свойства исходных данных для коллаборативной фильтрации. Такие данные упорядочиваются для каждого пользователя как последовательность предпочтений интересующих пользователя объектов. На основе свойств исходных данных показано, что при коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью необходимо упорядочивать не только данные о поведении пользователя, но и пропущенные и неточные данные. Предложен подход к упорядочиванию таких данных на основе их попарного сравнения. Усовершенствован метод коллаборативной фильтрации на основе уточнения весовых коэффициентов для обучающей выборки с учетом предварительного ранжирования входных данных. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: усовершенствован метод коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью путем присвоения дополнительных весов элементам в матрице исходных данных на основе ранжирования пропущенных и отрицательных результатов. Метод позволяет повысить точность рекомендаций по критерию AUC с учетом неполноты исходных данных.

Ключевые слова: коллаборативная фильтрация; машинное обучение; ранжирование; факторизация матриц; кривая ошибок; обучающая и тестовая выборки.

Введение

Коллаборативная фильтрация используется в рекомендательных системах. Рекомендательные системы традиционно используются для прогнозирования выбора интересных пользователю объектов на основе имеющейся информации, как о текущем пользователе, так и о других клиентах. В качестве объектов, представляющих интерес для пользователя, рассматриваются: новости, веб-сайты, фильмы, товары и т.п. [1-3].

В зависимости от типа входных данных рекомендательные системы применяют два вида обратной связи: явную (explicit feedback) и неявную (implicit feedback) [4].

Explicit feedback основана на явных отзывах и оценках пользователей, отражающих их интерес к книге, фильму или иному объекту.

Такую обратную связь использует, в частности, компания Netflix при формировании рейтинга для фильмов и телевизионных программ [5]. Пользователи имеют возможность выставить оценки в данном сервисе.

Однако в большинстве случаев получение явных оценок пользователей связано с трудностями, что и приводит к необходимости использования неявной обратной связи от пользователя. Implicit feedback отражает предпочтения пользователя на основе наблюдений за его поведением [6].

В качестве входных данных при неявной обратной связи обычно используют: историю покупок;

просмотренных сайтов; шаблоны поиска; шаблоны движения мыши, и т.п.

Ключевым подходом, который используется при построении рекомендательных систем с неявной обратной связью, является коллаборативная фильтрация (collaborative filtering) [2-7].

Данный подход основывается на принципах отбора по схожести пользователей либо по схожести объектов, с которыми взаимодействуют пользователи [8].

При коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью выявляют скрытые факторы, которые влияют на выбор пользователя.

При реализации коллаборативной фильтрации возникают проблемы, связанные с разреженностью данных, а также наличием релевантных данных.

Разреженность данных связана с тем, что в большинстве коммерческих рекомендательных систем основано на большом количестве данных о товарах и незначительном количестве оценок пользователей.

В результате матрица «объект – пользователь» получается очень большой с малым количеством данных о покупках/просмотрах. Это не позволяет повысить точность рекомендаций. Указанная проблема особенно актуальна для новых, только что созданных систем [2].

Проблема релевантности оценок часто возникает в случае холодного старта, поскольку новые объекты или пользователи затрудняют создание релевантных рекомендаций [3].

Для решения указанных проблем целесообразно использовать не только разреженные «положительные» данные – информацию о количестве покупок, просмотров, но и данных об «отрицательных» предпочтениях.

Однако существующие версии коллаборативной фильтрации ориентированы на положительные данные. Это не дает возможность получить генерализованную модель и может приводить к возникновению проблемы переобучения.

Изложенное свидетельствует об актуальности проблематики данной статьи.

Целью статьи является усовершенствование метода коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью на основе дополнительного ранжирования «отрицательных» исходных данных с тем, чтобы снизить количество ошибок распознавания.

Ранжирование отрицательных результатов в матрице исходных данных при построении рекомендаций с неявной обратной связью

В качестве исходных данных при построении рекомендаций используются:

– список пользователей

$$U = \{u_i\};$$

– список объектов, интересующих пользователей

$$E = \{e_j\};$$

– матрица рейтингов/покупок

$$R \subseteq U \times E;$$

пользователи взаимодействуют с объектами (товарами), формируя матрицу рейтингов в рекомендационной системе:

$$R = \{r_{ij}\},$$

где r_{ij} – рейтинг j – предмета e_j у пользователя u_i .

Очевидно, что каждый из пользователей ставит рейтинг (в случае явной обратной связи), покупает (в случае неявной связи) только незначительное подмножество товаров из общего списка. Поэтому матрица рейтингов обычно сильно разрежена, большинство ее элементов равны «0». Иными словами, только небольшая часть из возможных взаимодействий «пользователь-товар» будет присутствовать в наборе данных.

Результатами построения рекомендаций являются либо упорядоченный список объектов E_U для каждого пользователя либо упорядоченный список пользователей U_E , соответствующий каждому объекту.

Для обоих списков должно выполняться условие: объекты и пользователи присутствуют в матрице R :

$$E_U = \{e_i | \exists r_{ij} \in R\}; \quad (1)$$

$$U_E = \{u_j | \exists r_{ij} \in R\}. \quad (2)$$

Формируемый рекомендационной системой порядок пользователей либо объектов обладает свойствами всеобщности (3), транзитивности (4), антисимметричности (5):

$$\forall (e_i \neq e_k) \in E_U \exists (>) : e_i >_{u_j} e_k \vee e_i <_{u_j} e_k, \quad (3)$$

$$\forall (u_j \neq u_l) \in U_E \exists (>) : u_j >_{e_i} u_l \vee u_j <_{e_i} u_l,$$

$$\forall (e_i \neq e_k \neq e_n) \in E_U :$$

$$e_i >_{u_j} e_k \wedge e_k >_{u_j} e_n \Rightarrow e_i >_{u_j} e_n, \quad (4)$$

$$\forall (u_j \neq u_l \neq u_m) \in U_E :$$

$$u_j >_{u_j} u_l \wedge u_l >_{u_j} u_m \Rightarrow u_j >_{u_j} u_m,$$

$$\forall (e_i = e_k) \in E_U : e_i >_{u_j} e_k \wedge e_i <_{u_j} e_k, \quad (5)$$

$$\forall (u_j = u_l) \in U_E : u_j >_{u_j} u_l \wedge u_j <_{u_j} u_l,$$

Важное отличие систем с неявной обратной связью состоит в том, что вместо положительных и отрицательных рейтингов они используют только позитивные данные (например, количество покупок).

Остальные данные отражают как объекты, не представляющие интереса для пользователя, так и пропущенную информацию о покупках, просмотрах и т.п.

В процессе обработки матрицы R в рекомендационных системах обычно выполняется бинаризация данных. При этом позитивные данные представляются единицей, а остальная информация – нулем.

В дальнейшем в процессе машинного обучения представленные единицей данные рассматриваются как принадлежащие к классу, а все остальные, включая пропущенные – как лежащие за пределами класса.

Построенная в результате обучения модель должна предсказывать единицы в матрице исходных данных R .

Следовательно, пропущенная информация исключается из дальнейшего рассмотрения.

Однако полученная модель должна упорядочивать все объекты для каждого пользователя согласно описанных выше свойств (1) – (5), что требует ранжирования отрицательных результатов в матрице исходных данных.

Для выполнения ранжирования целесообразно выполнить попарное сравнение объектов e_j для каждого пользователя u_i , которые отражены в матрице R .

Предлагаемый подход к решению этой задачи включает в себя такие шаги:

1. Определение относительного порядка между объектами для каждого пользователя. На данном шаге выполняется попарное сравнение результатов (покупок, просмотров) для каждого пользователя.

Для пользователя формируется квадратная матрица, элементы которой указывают, какой из объектов является более интересным для него. Знак + в этой матрице означает, что элемент в строке более интересен, чем элемент в столбце.

Пример реализации данного шага для пользователя u_1 приведен на рис. 1.

u_1	e_1	e_2	e_3	e_4
	0	9	6	0

⇓

e_1	=	9	6	0
e_2	+	=	+	+
e_3	+	-	=	+
e_4	?	-	-	=

Рис. 1. Определение относительного порядка между парами объектов для каждого пользователя

Так, знак + в ячейке (2,1) означает, что для пользователя u_1 элемент e_2 предпочтительнее элемента e_1 . Действительно, пользователь выбрал элемент e_2 9 раз, а элемент e_1 - 0 раз.

Знак вопроса в ячейке квадратной матрицы означает, что предпочтения установить не удалось. Например, пользователь не выбирал оба элемента e_1 и e_4 поэтому в ячейке (4,1) стоит вопросительный знак.

2. Определение весов для объектов. На данном шаге на основе отношений между объектами определяются веса, отражающие возможный интерес пользователя к этим объектам.

Основная идея шага заключается в следующем. Нам необходимо в результате обучения построить достаточно обобщенную модель, которая отражала бы общие тенденции и предпочтения пользователей и позволяла бы избежать отдельных флуктуаций, отражающих специфику конкретного набора данных.

Традиционно такая задача решается путем регуляризации. Коэффициент регуляризации подбирается таким образом, чтобы сгладить флуктуации отдельных переменных относительно требуемой закономерности.

В нашем случае причинами пропуска объектов пользователем (например, e_1 и e_4) могут быть:

- отсутствие интереса;
- отсутствие доступа;
- ошибка в записях.

При традиционном подходе все эти причины объединяются и рассматриваются как отсутствие интереса пользователя к объекту.

Это может привести флуктуациям и соответствующему искажению общих закономерностей в полученной модели. Для исключения такой зависимости от конкретных данных предлагается добавить небольшие значения пропущенным элементам в соответствии с установленной на шаге 1 упорядоченностью.

Для представленного на рис.1 упрощенного примера получаем такую упорядоченность элементов: $e_2(9)$, $e_3(6)$, e_1 и $e_4(?)$.

Линейная экстраполяция полученной последовательности элементов e_i очевидно приводит к таким их значениям: 9; 6; 3; 3. Для исключения флуктуаций используем коэффициент регуляризации, например $\lambda = 0,1$. Тогда упорядоченная последовательность значений элементов принимает такой вид: 9; 6; 0,3; 0,3. Последние 2 значения в последовательности элементов отражают потенциальный интерес пользователя к элементам e_1 и e_4 как результат отсутствия доступа или ошибки в исходных данных.

Очевидно, что представленная в примере линейная интерполяция является частным случаем общей закономерности, связывающей веса элементов $e_1 - e_4$.

В более общем случае требуется построение регрессии методами машинного обучения для того, чтобы рассчитать значения пропущенных элементов.

Значение коэффициента λ подбирается экспериментально.

Для этого в рамках коллаборативной фильтрации необходимо провести нескольких циклов машинного обучения с разными значениям λ .

Сравнение полученных моделей выполняется по метрике AUC, как будет показано в описании метода.

Коллаборативная фильтрация с неявной обратной связью с уточнением пропущенных данных

Усовершенствованный метод коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью включает в себя следующие этапы:

- подготовка отфильтрованной матрицы исходных данных R^* ;
- формирование обучающей и тестовой выборок из матрицы R^* ;
- выявление неявных связей между клиентами и товарами на основе матричной факторизации;
- оценка полученных рекомендаций.

На этапе подготовки матрицы R^* выполняются такие шаги: фильтрация данных; проверка пригодности исходных данных; построение матрицы R «пользователи-объекты» из исходной базы данных; построение матрицы приоритетов.

На шаге фильтрации данных из исходных записей удаляются ошибочные строки, т.е. такие, в которых отсутствует информация о пользователе либо об объекте его интереса (товаре).

На шаге проверки пригодности исходных данных проводится проверка разреженности матрицы. На практике в качестве порога разреженности обычно рассматривают значение 99,5%. Если разреженность не превышает этот порог, то исходные данные считаются пригодными для формирования рекомендаций.

На шаге построения матрицы «пользователи-объекты» реализуются инженерные решения, позволяющие преобразовать имеющиеся записи о покупках (просмотрах) в стандартный формат исходных данных.

На шаге построения матрицы весов приоритеты c_{ij} для «положительных» данных формируются путем нормирования количества покупок для элементов r_{ij} .

Последовательность формирования приоритетов для «отрицательных» данных была приведена выше.

На этапе формирования обучающей и тестовой выборок выполняется обработка исходной матрицы R^* .

Обе выборки создаются из этой матрицы. На данном этапе выполняются такие шаги: формируется обучающая выборка путем маскирования части данных; формируется тестовая выборка путем бинаризации исходной матрицы.

В качестве обучающей выборки используется подмножество элементов матрицы R^* . Основная задача данного шага заключается в том, чтобы отразить характер взаимодействия максимального количества пользователей с большинством объектов. Поэтому около 30% элементов данной матрицы удаляется случайным образом.

Тестовая выборка формируется путем замены количества покупок/просмотров значением 1.

Задача факторизации методами машинного обучения [9, 10] заключается в минимизации взвешенного квадрата отклонений для всех элементов исходной матрицы R :

$$\min \sum_{i,j} c_{ij} (r_{ij} - x_i^T y_j)^2,$$

где x_i^T – транспонированная i – строка матрицы «пользователь - латентная переменная»;

y_j – строка j матрицы «латентная переменная – объект».

На этапе факторизации матриц предлагается использовать метод ALS (Alternating Least Squares Method).

Особенность данного метода состоит в поочередном нахождении минимума:

то для элемента «пользователь – переменная» при фиксации элемента «переменная – объект»,

то для элемента «переменная – объект» при фиксированных элементах «пользователь – переменная».

На этапе оценки полученных рекомендаций используется кривая ошибок ROC (Receiver Operating Characteristic) и соответствующая метрика AUC. Данная кривая отражает соотношение между TPR и FPR для всех элементов выборки.

Чем ближе кривая к вертикальной оси, тем меньше ошибка классификации. При этом увеличивается площадь под кривой. Поэтому площадь под кривой ошибок AUC (Area Under the Curve) используется для оценки результатов прогнозирования. AUC можно рассматривать как вероятность того, что случайно выбранные корректные рекомендации окажутся выше в списке случайно выбранных плохих подсказок.

Выполненная экспериментальная проверка усовершенствованного метода показала, что для выборки объемом 250 тыс. записей, отражающей покупки в сети интернет-магазинов, AUC после ранжирования отрицательных результатов увеличилась с 0,862 до 0,897.

Выводы

В статье усовершенствован метод коллаборативной фильтрации с неявной обратной связью путем присвоения весов элементам в матрице исходных данных с учетом ранжирования отрицательных результатов.

Ранжирование основано на попарном сравнении предпочтений каждого пользователя по отношению к объектам в матрице исходных данных.

По результатам попарного сравнения формируется относительный порядок элементов для каждого пользователя, что позволяет присвоить веса элементам матрицы исходных данных.

В практическом плане метод позволяет повысить точность рекомендаций с учетом неполных исходных данных.

REFERENCES

1. Adomavicius G. and Tuzhilin A. (2005), "Towards the Next Generation of Recommender Systems" *A Survey of the State-of-the-Art and Possible Extensions, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, No. 17, pp. 634–749.
2. Ekstrand, M.D., Riedl J.T., and Konstan J.A. (2011), "Collaborative filtering recommender systems", *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction* No. 4(2), pp. 81–173.
3. Herlocker J.L., Konstan J.A., Terveen L.G. and Riedl J.T. (2004), "Evaluating collaborative filtering recommender systems" *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)* 22, 1, pp. 5–53.
4. Guo G., Zhang J. and Yorke-Smith N. (2015), "TrustSVD: Collaborative Filtering with Both the Explicit and Implicit Influence of User Trust and of Item Ratings" *AAAI*, pp. 123–129.

5. Bennet J. and Lanning S. (2007) "The Netflix Prize", *Proceedings of KDD cup and workshop*, available at: <http://www.netflixprize.com>. (last accessed March 22, 2018).
6. Hu Y., Koren Y. and Volinsky C. (2008), "Collaborative filtering for implicit feedback datasets", *Data Mining, ICDM'08. Eighth IEEE International Conference on. IEEE*, pp. 263–272.
7. Pan R., Zhou Y., Cao B., Liu N. N., Lukose R. M., Scholz M., and Yang Q. (2008), "One-class collaborative filtering", *IEEE International Conference on Data Mining*, pp. 502-511.
8. Linden G., Smith B. and York J. (2003), "Amazon.com recommendations: Item-to-item collaborative filtering", *Internet Computing, IEEE 7, 1*, pp. 76–80.
9. Yi Fang and Luo Si. (2011), "Matrix co-factorization for recommendation with rich side information and implicit feedback" *Proceedings of the 2nd International Workshop on Information Heterogeneity and Fusion in Recommender Systems. ACM*, pp. 65–69.
10. Yehuda Koren, Robert Bell, and Chris Volinsky. (2009), "Matrix factorization techniques for recommender systems", *Computer No.8*, pp. 30–37.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. О. Можаяв,

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Received (Надійшла) 14.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.05.2018

Вдосконалення методу колаборативної фільтрації з неявним зворотнім зв'язком на основі ранжування негативних результатів в матриці вхідних даних

В. О. Лешинський, І. О. Лешинська

Предметом вивчення в статті є процеси виявлення вподобань користувачів в рекомендаційних системах. **Метою** є розробка вдосконаленого методу колаборативної фільтрації на основі ранжування пропущених і негативних результатів в матриці вхідних даних. **Завдання:** Формалізувати властивості вхідних даних, включно з пропущеними даними для задачі колаборативної фільтрації; розробити підхід до ранжування вхідних даних для колаборативної фільтрації з неявним зворотнім зв'язком, включно з пропущеними і негативними результатами; удосконалити метод колаборативної фільтрації шляхом попереднього ранжування пропущених і негативних результатів у вхідних даних. Використовуваними **методами** є: колаборативна фільтрація, машинне навчання. Отримані наступні **результати**. Формалізовані властивості вхідних даних. Такі дані упорядковуються для кожного користувача як послідовність переваг цікавлять користувача об'єктів. На основі властивостей вхідних даних показано, що при колаборативній фільтрації з неявним зворотнім зв'язком необхідно упорядковувати не тільки дані про поведінку користувача, але і пропущені та неточні дані. Запропоновано підхід до впорядкування таких даних на основі їх попарного порівняння. Удосконалено метод колаборативної фільтрації на основі уточнення вагових коефіцієнтів для навчальної вибірки з урахуванням попереднього ранжування вхідних даних. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: удосконалено метод колаборативної фільтрації з неявним зворотнім зв'язком шляхом присвоєння додаткових ваг елементам в матриці вхідних даних на основі ранжування пропущених і негативних результатів. Метод дозволяє підвищити точність рекомендацій за критерієм AUC з урахуванням неповноти вхідних даних.

Ключові слова: колаборативна фільтрація; машинне навчання; ранжування; факторизація матриць; крива помилок; навчальна і тестова вибірки.

Collaborative Filtering for Implicit Feedback Datasets using Ranking Negative Data

V. Leshchynskyi, I. Leshchynska

The **subject matter** of the article is the processes of revealing the preferences of users in recommender systems. The **goal** is to develop an improved method of collaborative filtering based on the ranking of missed and negative results in the matrix of input data. **Tasks:** Formalize the properties of the source data, including missing data for the collaborative filtering task; develop an approach to the ranking of input data for collaborative filtering with implicit feedback, including missed and negative results; improve the method of collaborative filtering by pre-ranking the missed and negative results in the original data. The **methods** used are: collaborative filtering, machine learning. The following **results** were obtained. The properties of the initial data are formalized. Such data is arranged for each user as a sequence of preferences of objects of interest to the user. Based on the properties of the source data, it is shown that with collaborative filtering with implicit feedback, it is necessary to organize not only data about the user's behavior, but also missed and inaccurate data. An approach to the ordering of such data is proposed on the basis of their pairwise comparison. The method of collaborative filtering is improved on the basis of refinement of weight coefficients for the training sample, taking into account the preliminary ranking of the input data. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows: the method of collaborative filtering with implicit feedback has been improved by assigning additional weights to the elements in the matrix of the initial data based on the ranking of the missed and negative results. The method allows to increase the accuracy of the AUC criteria taking into account the incompleteness of the initial data.

Keywords: collaborative filtering; machine learning; ranging; factorization of matrices; error curve; training and test samples.

Ю. В. Приставка

Полтавський національний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна

ТОЧНІ РОЗВ'ЯЗКИ НЕЛІНІЙНОГО (1+2)-ВИМІРНОГО РІВНЯННЯ РЕАКЦІЇ-КОНВЕКЦІЇ-ДИФУЗІЇ

Предметом вивчення в статті є застосування літвського методу до побудови інваріантних анзаців, редукції та знаходження точних розв'язків (1+2)-вимірною рівняння реакції-конвекції-дифузії. **Мета** - здійснити побудову точних розв'язків (1+2)-вимірною рівняння реакції-конвекції-дифузії на основі використання симетричних властивостей цього рівняння. **Задача** – використати літвську симетрію рівняння (1+2)-вимірною рівняння реакції-конвекції-дифузії для побудови інваріантних анзаців, редукції та знаходження його точних розв'язків. Для реалізації цієї задачі використано метод Софуса Лі, в основі його лежить принцип симетрії. Згідно з методом С. Лі диференціальні рівняння з частинними похідними, які володіють класичною літвською симетрією, можна редукувати до звичайних диференціальних рівнянь за допомогою спеціальних підстановок (анзаців). Розв'язавши редуковані рівняння, можна побудувати точні розв'язки вихідного диференціального рівняння з частинними похідними. **Висновки:** використано симетрійні властивості (1+2)-вимірною рівняння реакції-конвекції-дифузії для побудови інваріантних анзаців, редукції та знаходження його точних розв'язків.

Ключові слова: (1+2)-вимірне рівняння реакції-конвекції-дифузії, симетрія, метод Лі, максимальна алгебра інваріантності, інваріантний анзац, редукована система, точні розв'язки.

Вступ

У сучасних наукових дослідженнях вивчення багатьох фізичних, біохімічних, екологічних процесів проводиться на основі аналізу відповідних математичних моделей. Значну кількість фундаментальних законів природи можна описати за допомогою диференціальних рівнянь з частинними похідними та їх систем.

До таких рівнянь відносять (1+2)-вимірне рівняння реакції-конвекції-дифузії.

$$\Delta u = f^0(u)u_0 + f^a(u)u_a + h(u), \quad (1)$$

де $u = u(x_0, x_1, x_2)$, x_0 – часова змінна, x_1, x_2 – просторові змінні, $f^0(u)$, $f^a(u)$, $h(u)$ – коефіцієнти дифузії, конвекції та реакції відповідно, індекс біля функції внизу означає диференціювання за відповідною змінною, за індексами, які повторюються, розуміється сумування, $a \in \{1, 2\}$.

Рівняння (1) використовується для опису різних фізичних процесів, зокрема процесів теплопровідності, дифузії та конвекції. Воно застосовується для моделювання руху частинок, енергії або інших фізичних величин у певній фізичній системі. При конкретних значеннях нелінійностей рівняння (1) використовується при описі переносу кисню в кровоносній системі, для моделювання росту тромбу в пристінковому потоці.

Одним із застосувань даного рівняння також є дослідження процесів розповсюдження речовини, яка забруднює водойми. Гідродинамічна нестійкість, яка виникає поблизу поверхні розподілу двох рідин, що не змішуються, і описується рівнянням (1), зустрічається в таких галузях, як нафтопереробка, процеси горіння, сепарація руд і т. п.

Основна частина

Розглянемо рівняння

$$u_0 = \partial_a(u^k u_a) + u^k \lambda_a u_a + \frac{\bar{\lambda}^2}{4(k+1)} u^{k+1}, \quad (2)$$

де λ_a , k – довільні сталі.

Серед рівнянь (1) з ненульовим конвективним доданком це рівняння володіє найширшим класом симетрії.

Поставимо задачу використати симетрійні властивості рівняння (2) для побудови інваріантних анзаців, редукції та знаходження його точних розв'язків.

Теорема 1. Максимальною алгеброю інваріантності рівняння (2) є така алгебра

$$\langle \partial_0, \partial_1, \partial_2, D = kx_0\partial_0 + u\partial_u, Q_1, Q_2 \rangle, \quad (3)$$

$$\text{де } Q_1 = e^{w[(\lambda_a \cos \omega + \lambda_a^\perp \sin \omega)\partial_a - \frac{\bar{\lambda}^2}{2(k+1)} \cos \omega u \partial_u]},$$

$$Q_2 = e^{w[(-\lambda_a^\perp \cos \omega + \lambda_a \sin \omega)\partial_a - \frac{\bar{\lambda}^2}{2(k+1)} \sin \omega u \partial_u]},$$

$$w = -\frac{k}{4(k+1)} \bar{\lambda} \bar{x}, \quad \omega = -\frac{k}{4(k+1)} \bar{\lambda}^\perp \bar{x}, \quad \bar{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2),$$

$\bar{\lambda}^\perp = (-\lambda_2, \lambda_1)$ – вектор, перпендикулярний до вектора $\bar{\lambda}$.

Теорема 1 доводиться стандартним методом Лі (див. [2, 3]).

Використавши заміну

$$\begin{aligned} \frac{16(k+1)^2}{k^2 \bar{\lambda}^2} x_0 \rightarrow x_0, \quad \frac{k}{4(k+1)} \bar{\lambda} \bar{x} \rightarrow x_1, \\ -\frac{k}{4(k+1)} \bar{\lambda}^\perp \bar{x} \rightarrow x_2, \quad u \rightarrow u, \end{aligned} \quad (4)$$

перейдемо до рівняння

$$u_0 = \partial_a(u^k u_a) + u^k u_1 + \frac{1}{4(k+1)} u^{k+1}. \quad (5)$$

Перші чотири оператори алгебри (3) в нових змінних матимуть той же вигляд, зміняться лише Q_1 та Q_2 . Вони набудуть вигляду

$$Q_1 = e^{-x_1} (\cos x_2 \partial_1 - \sin x_2 \partial_1 - \frac{2}{k} \cos x_2 u \partial_u),$$

$$Q_2 = e^{-x_1} (\sin x_2 \partial_1 + \cos x_2 \partial_1 - \frac{2}{k} \sin x_2 u \partial_u).$$

Проведемо редукцію рівняння (5) до рівняння з меншою кількістю змінних, використовуючи найзагальніший вигляд оператора інваріантності

$$X = d_0 \partial_0 + d_a \partial_a + c_0 D + c_1 Q_1 + c_2 Q_2. \quad (6)$$

Один з анзаців (наприклад, [5]), отриманий за допомогою оператора (6) має вигляд

$$u = e^{-\frac{2}{k} x_1} \varphi(x_0, \omega), \quad \omega = \dot{z}(x_2) e^{x_1} + m e^{2x_1}, \quad (7)$$

де $z = z(x_2)$ – довільний розв'язок рівняння $\ddot{z} + z = 0$. Даний анзац редукує рівняння (5) до диференціального рівняння

$$\varphi_0 = (4m\omega + \bar{c}^2) \partial_\omega (\varphi^k \varphi_\omega) + 4m \varphi^k \varphi_\omega.$$

Припустивши, що $m = 0$, прийдемо до рівняння

$$\varphi_0 = \bar{c}^2 \partial_\omega (\varphi^k \varphi_\omega).$$

Використавши заміну

$$x_0 \rightarrow \frac{1}{\bar{c}^2} x_0, \quad \omega \rightarrow \omega, \quad \varphi \rightarrow \varphi \quad (8)$$

одержимо рівняння

$$\varphi_0 = \partial_\omega (\varphi^k \varphi_\omega). \quad (9)$$

Теорема 2 [3]. Максимальною алгеброю інваріантності рівняння (9) є алгебра

$$1) \langle \partial_0, \partial_\omega, D = 2x_0 \partial_0 + \omega \partial_\omega, D_0 = kx_0 \partial_0 - \varphi \partial_\varphi \rangle,$$

якщо $k \neq -4/3$.

$$2) \langle \partial_0, \partial_\omega, D_0 = 4x_0 \partial_0 + 3\varphi \partial_\varphi, D_1 = 2\omega \partial_\omega - 3\varphi \partial_\varphi, K = \omega^2 \partial_\omega - 3\omega \varphi \partial_\varphi \rangle, \quad (10)$$

якщо $k = -4/3$.

Використаємо лівську симетрію рівняння (9) для побудови його інваріантних анзаців, редукції та знаходження розв'язків (див., [6]).

Наведемо вигляд нееквівалентних анзаців, які одержуються у випадку $k \neq -4/3$:

$$\varphi = \psi(y), \quad y = \omega + px_0; \quad (11)$$

$$\varphi = x_0^{-1/k} \psi(y), \quad y = \omega + p \ln x_0; \quad (12)$$

$$\varphi = e^{-\frac{2p}{k} x_0} \psi(y), \quad y = e^{px_0} \omega; \quad (13)$$

$$\phi = x_0^{\frac{1+2p}{k}} \psi(y), \quad y = x_0^p \omega, \quad (14)$$

де p – довільна стала ($p \neq 0$), яка виражається через сталі c_0, c_1, d_0, d_1 .

Для знаходження невідомих функцій ψ необхідно одержані вище анзаці підставити у рівняння (9). У результаті отримаємо відповідно такі редуковані рівняння:

$$\partial_y (\psi^k \psi_y) - p \psi_y = 0, \quad (15)$$

$$\partial_y (\psi^k \psi_y) - p \psi_y - \frac{1}{k} \psi = 0,$$

$$\partial_y (\psi^k \psi_y) - p y \psi_y + \frac{2p}{k} \psi = 0,$$

$$\partial_y (\psi^k \psi_y) - p y \psi_y + \frac{2p+1}{k} \psi = 0.$$

Частинними розв'язками редукованого рівняння (15) ([3, 4]) є

$$\psi = (pky + c)^{\frac{1}{k}}, \quad k \neq 0; \quad (16)$$

$$\psi = -th^2 \left[\frac{p}{2} y + c \right], \quad k = -\frac{1}{2}; \quad (17)$$

$$\psi = tg^2 \left[\frac{p}{2} y + c \right], \quad k = -\frac{1}{2}; \quad (18)$$

$$\operatorname{arctg} \psi^{\frac{1}{4}} + \operatorname{arctg} \psi^{\frac{1}{4}} = -\frac{p}{2} y + c, \quad k = -\frac{3}{4}, \quad (19)$$

де c – довільна стала.

Використавши анзац (11) та розв'язки (16)-(19), знаходимо розв'язки рівняння (2):

$$u = e^{-\frac{1}{2(k+1)} \bar{\lambda} \bar{x}} \left[pk \left(\dot{z} \left(\frac{k}{4(k+1)} \bar{\lambda}^{-1} \bar{x} \right) e^{\bar{\lambda} \bar{x} \cdot k / (4(k+1))} + \right. \right.$$

$$\left. \left. + \frac{16p\bar{c}^2(k+1)^2}{k^2 \bar{\lambda}^2} x_0 \right) + c \right]^{1/k}, \quad k \neq 0;$$

$$u = -e^{-\bar{\lambda} \bar{x}} \left(x_0 \cdot 16\bar{c}^2 / \bar{\lambda}^2 \right)^2 \times$$

$$\times th^2 \left[\frac{p}{2} \left(\dot{z} \left(\frac{1}{4} \bar{\lambda}^{-1} \bar{x} \right) e^{-\frac{1}{4} \bar{\lambda} \bar{x}} + \frac{16p\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right) + c \right], \quad k = -\frac{1}{2};$$

$$u = e^{-\bar{\lambda} \bar{x} - 4p\bar{c}^2 x_0} \times$$

$$\times tg^2 \left[\frac{p}{2} \left(\dot{z} \left(\frac{1}{4} \bar{\lambda}^{-1} \bar{x} \right) \exp \left(-\frac{1}{4} \bar{\lambda} \bar{x} + \frac{16p\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right) \right) + c \right], \quad k = -\frac{1}{2};$$

$$\begin{aligned} & \operatorname{arctg} \left[\left(\frac{16\bar{c}^2}{9\bar{\lambda}^2} x_0 \right)^{-4(1+2p)/3} e^{-2\bar{\lambda}\bar{x}} u \right]^{1/4} + \\ & + \operatorname{arctg} \left[\left(\frac{16\bar{c}^2}{9\bar{\lambda}^2} x_0 \right)^{-4(1+2p)/3} e^{-2\bar{\lambda}\bar{x}} u \right]^{1/4} = \\ & = -\frac{p}{2} \left[\left(\frac{16\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right)^p \left(\dot{z} \left(\frac{3}{4} \bar{\lambda}^\perp \bar{x} \right) e^{-\frac{3}{4}\bar{\lambda}\bar{x}} \right) \right] + c, \quad k = -\frac{3}{4}. \end{aligned}$$

Максимальною алгеброю інваріантності рівняння (9) при $k = -\frac{4}{3}$ є алгебра (10). Не вдаючись у деталі інтегрування, наведемо вигляд інваріантних анзаців, які одержуються в результаті

$$\begin{aligned} \varphi &= (\omega^2 + r)^{-3/2} \psi(y), \quad r \in \{-1, 0, 1\}, \\ y &= \begin{cases} \operatorname{arctg} \omega + px_0, & r = -1, \\ \frac{1}{\omega} + px_0, & r = 0, \\ -\operatorname{arctg} \omega + px_0, & r = 1; \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \varphi &= x_0^{3/4} (\omega^2 + r)^{-3/2} \psi(y), \quad r \in \{-1, 0, 1\}, \\ y &= \begin{cases} \operatorname{arctg} \omega + p \ln x_0, & r = -1, \\ \frac{1}{\omega} + p \ln x_0, & r = 0, \\ -\operatorname{arctg} \omega + p \ln x_0, & r = 1, \end{cases} \end{aligned} \quad (21)$$

де p – довільна стала ($p \neq 0$), яка виражається через сталі c_0, c_1, d_0, d_1 .

Для знаходження невідомих функцій ψ необхідно одержані вище анзаці підставити у рівняння (9). У результаті отримаємо відповідно такі редуковані рівняння:

$$\partial_y (\psi^{\frac{4}{3}} \psi_y) = p \psi_y + 3r \psi^{\frac{1}{3}}, \quad (22)$$

$$\partial_y (\psi^{\frac{4}{3}} \psi_y) = p \psi_y + \left(\frac{3}{4} \psi^{\frac{4}{3}} + 3r \right) \psi^{\frac{1}{3}}. \quad (23)$$

Загальний розв'язок рівняння (22) при $r = 0$ є

$$\begin{aligned} & -3c_1^{-1} \psi^{-\frac{1}{3}} + \frac{1}{2} \ln \frac{\psi^{-\frac{2}{3}} - c_1 \psi^{-\frac{1}{3}} + c_1^2}{(\psi^{-1/3} + c_1)^2} - \\ & - \sqrt{3} \operatorname{arctg} \frac{2}{c_1 \sqrt{3}} \left(\psi^{\frac{1}{3}} - \frac{1}{2} c_1 \right) = c_1^{-4} p(y + c_2) \end{aligned} \quad (24)$$

при $c_1 \neq 0$, та

$$\psi = \left(-\frac{4}{3} py + c \right)^{-3/4} \quad (25)$$

при $c_1 = 0$.

Один із розв'язків рівняння (22) при $r = -1$ має вигляд

$$\psi = 4^{3/4}. \quad (26)$$

Використавши формули (4), (7), (8), (20), (21) знаходимо розв'язки рівняння (2):

$$\begin{aligned} & -3c_1^{-1} \Phi + \frac{1}{2} \ln \frac{\Phi^2 - c_1 \Phi + c_1^2}{(\Phi + c_1)^2} - \sqrt{3} \operatorname{arctg} \frac{2}{c_1 \sqrt{3}} \times \\ & \times \left(\Phi - \frac{1}{2} c_1 \right) = c_1^{-4} p \left(\dot{z} (\bar{\lambda}^\perp \bar{x}) e^{-\bar{\lambda}\bar{x}} + \frac{p\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} + c_2 \right), \end{aligned}$$

$$\Phi = \dot{z}^{-1} (\bar{\lambda}^\perp \bar{x}) e^{-\frac{1}{2}\bar{\lambda}\bar{x}} u^{\frac{1}{3}}, \quad c_1 \neq 0,$$

$$\begin{aligned} u &= e^{\frac{3}{2}\bar{\lambda}\bar{x}} \dot{z}^{-3} (\bar{\lambda}^\perp \bar{x}) \times \\ & \times \left[-\frac{4}{3} p (e^{-\bar{\lambda}\bar{x}} \dot{z}^{-1} (\bar{\lambda}^\perp \bar{x}) + \frac{p\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0) + c \right]^{-3/4}; \\ u &= \left(4 \frac{\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right)^{\frac{3}{4}} e^{\frac{3}{2}\bar{\lambda}\bar{x}} \left(\dot{z} (\bar{\lambda}^\perp \bar{x}) e^{-\bar{\lambda}\bar{x}} - 1 \right)^{\frac{3}{2}}. \end{aligned}$$

Проведемо лінеаризацію рівняння (9) при умові $k = -2$. Застосуємо до даного рівняння сукупність двох перетворень (див., наприклад, [6], [8]):

$$x_0 = x_0, \quad \omega = \omega, \quad \varphi = v_\omega^{-1}$$

де $v = v(x_0, \omega)$ – нова невідома функція,

$$x_0 = t, \quad \omega = w, \quad v = x,$$

де t, x – нові незалежні змінні, $w = w(t, x)$ – нова залежна змінна.

У результаті одержимо рівняння

$$w_t = w_{xx} \dots \quad (27)$$

Це лінійне рівняння теплопровідності. Його симетрійні властивості добре відомо.

Максимальною алгеброю інваріантності рівняння (27) є нескінченно вимірна алгебра, підалгеброю якої є узагальнена алгебра Галілея

$$\begin{aligned} & \langle \partial_t, \partial_x, G = t\partial_x + x\partial_t, Q = -\frac{1}{2} w\partial_w, D = 2t\partial_t + x\partial_x, \\ & P = t^2\partial_t - tx\partial_x + \left(\frac{x^2}{2} + t \right) \partial_x \rangle. \end{aligned}$$

Використаємо лівську симетрію рівняння (27) для побудови його інваріантних анзаців. Для цієї мети використаємо лінійну комбінацію операторів узагальненої алгебри Галілея

$$k_0 \partial_t + k_1 \partial_x + k_2 G + k_3 Q + k_4 D + k_5 P.$$

Застосувавши метод знаходження інваріантних анзаців (див., наприклад [7, 8]), одержимо такі неек-

івалентні випадки

$$w = e^{pt} \psi(y), \quad y = x + nt; \quad (28)$$

$$w = t^p \psi(y), \quad y = \frac{x}{\sqrt{t}}; \quad (29)$$

$$w = e^{\frac{xt+2}{3}t^3} \psi(y), \quad y = x + t^2; \quad (30)$$

$$w = e^{\frac{1}{4} \frac{x^2 t}{t^2+1} p \arctan t} \times \quad (31)$$

$$\times (t^2 + 1)^{-\frac{1}{4}} \psi(y), \quad y = \frac{x}{t^2 + 1}.$$

Підставивши анзаці (27)-(30) у рівняння (26), одержимо такі редуковані рівняння:

$$\ddot{\psi} - n\dot{\psi} - p\psi = 0; \quad (32)$$

$$\ddot{\psi} + \frac{1}{2}y\dot{\psi} - p\psi = 0;$$

$$\ddot{\psi} - y\psi = 0;$$

$$\ddot{\psi} - \left(\frac{1}{4}y^2 + \frac{1}{2}\right)\psi = 0. \quad (33)$$

Розв'язками редукованого рівняння (32) в залежності від значень сталих n і p є

$$\psi = c_1 e^{k_1 y} + c_2 e^{k_2 y}; \quad (34)$$

$$\psi = (c_1 + c_2 y) e^{k_3 y}; \quad (35)$$

$$\psi = (c_1 \cos \beta y + c_2 \sin \beta y) e^{\alpha y}. \quad (36)$$

Використавши анзац (28) та розв'язки (34)-(36), знаходимо розв'язки рівняння (2), записані у параметричному вигляді:

$$\bar{\lambda} \bar{x} = 2 \times \times \ln \frac{c_3 e^{k_1(\tau + \frac{4n\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0)} + c_4 e^{k_2(\tau + \frac{4n\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0)}}{\dot{z} \left(\frac{1}{2} \bar{\lambda} \bar{x} \right)} + 8p \frac{\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0;$$

$$u = \frac{1}{\dot{z} \left(\bar{\lambda} \bar{x} / 2 \right)} \times$$

$$\times \frac{c_3 e^{k_1(\tau + \frac{4n\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0)} + c_4 e^{k_2(\tau + \frac{4n\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0)}}{c_3 k_1 e^{k_1(\tau + \frac{16n\bar{c}^2}{k^2 \bar{\lambda}^2} x_0)} + c_4 k_2 e^{k_2(\tau + \frac{16n\bar{c}^2}{k^2 \bar{\lambda}^2} x_0)}};$$

$$\bar{\lambda} \bar{x} = 2 \ln \frac{\tau + \frac{4n\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0}{\dot{z} \left(\frac{1}{4} \bar{\lambda} \bar{x} \right)} + 8 \frac{\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} (p + k_3 n) x_0 + 2k_3 \tau;$$

$$u = \frac{1}{\dot{z} \left(\bar{\lambda} \bar{x} / 2 \right)} \frac{\tau + \left(4n\bar{c}^2 / \bar{\lambda}^2 \right) \cdot x_0}{1 + k_3 \left(\tau + n \cdot \left(4n\bar{c}^2 / \bar{\lambda}^2 \right) \cdot x_0 \right)};$$

$$\bar{\lambda} \bar{x} = 2 \times$$

$$\times \ln \frac{c_3 \cos \beta \left(\tau + \frac{4n\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right) + c_4 \sin \beta \left(\tau + \frac{4n\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right)}{\dot{z} \left(\bar{\lambda} \bar{x} / 2 \right)} +$$

$$+ 8p \cdot \left(\bar{c}^2 / \bar{\lambda}^2 \right) \cdot (p + \alpha n) x_0 + 2\alpha \tau,$$

$$u = \frac{1}{\dot{z} \left(\bar{\lambda} \bar{x} / 2 \right)} \cdot \frac{c_3 \cos A + c_4 \sin A}{(c_3 \alpha + c_4 \beta) \cos A + (c_4 \alpha - c_3 \beta) \sin A},$$

де $A = \beta \cdot \left(\tau + 4n\bar{c}^2 \cdot x_0 / \bar{\lambda}^2 \right)$, τ – довільний параметр.

Розв'язком редукованого рівняння (33) ([1]) є

$$\psi = e^{\frac{1}{4}y^2} \left(c_1 + c_2 e^{-\frac{1}{2}y^2} dy \right). \quad (37)$$

Використавши анзац (31) та розв'язок (37), знаходимо розв'язок рівняння (2), записаний у параметричному вигляді:

$$\bar{\lambda} \bar{x} = 2 \ln \left(\begin{array}{l} \dot{z}^{-1} \sigma^{-1/4} W \times \\ \times \exp \left(\tau^2 \frac{1 - 4\bar{c}^2 x_0 / \bar{\lambda}^2}{4\sigma} - \frac{1}{2} \arctg \frac{4\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right) \end{array} \right),$$

$$u = \left(\begin{array}{l} \dot{z}^{-1} \sigma^{-1/4} W \times \\ \times \exp \left(\tau^2 \frac{1 - 4\bar{c}^2 / \bar{\lambda}^2 \cdot x_0}{4\delta} - \frac{1}{2} \arctg \frac{4\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0 \right) \end{array} \right)^{-1} \times$$

$$\times e^{\tau^2 \frac{1 - 4\bar{c}^2 \cdot x_0 / \bar{\lambda}^2}{4\sigma} - \frac{1}{2} \arctg \frac{4\bar{c}^2}{\bar{\lambda}^2} x_0} \frac{3}{\sigma^{\frac{3}{4}} \times}$$

$$\times \left(-\tau \frac{1 - 4\bar{c}^2 \cdot x_0 / \bar{\lambda}^2}{2\sigma} W + c_4 \exp \left(-\tau^2 / (2\sigma) \right) \right),$$

де $\sigma = \sigma(x_0) = x_0^2 \cdot 4\bar{c}^4 / \bar{\lambda}^2 + 1$, $z = z \left(\bar{\lambda} \bar{x} / 2 \right)$,

$$W = c_3 + c_4 \int_0^{\tau/\sqrt{\sigma}} e^{-v^2/2} dv, \quad \tau - \text{довільний параметр.}$$

Висновки

Таким чином, ми використали симетрійні властивості рівняння (2) для побудови інваріантних анзаців, редуції та знаходження його точних розв'язків. Знайдені нами точні розв'язки рівняння (2) містять довільні сталі

$$m, c, c_1, c_2, c_3, c_4, k_1, k_2, k_3, p, n, \alpha, \beta.$$

Отже, можна стверджувати, що ми побудували декілька багатопараметричних класів точних розв'язків даного рівняння. Це дає можливість застосувати одержані розв'язки для розв'язування різноманітних граничних та початкових задач.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Наука, 1965. – 704 с.
2. Овсянников Л.В. Групповой анализ дифференциальных уравнений / Л.В. Овсянников. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
3. Овсянников Л.В. Групповые свойства уравнений нелинейной теплопроводности. Доклады АН СССР / Л.В. Овсянников. – Т. 125, 1959. – С. 492-495.
4. Олвер П. приложения групп Ли к дифференциальным уравнениям / П. Олвер. – М.: Мир, 1989. – 581 с.
5. Фушич В.И. О нелокальных анзацах для одного нелинейного одномерного уравнения теплопроводности / В.И. Фушич, Н.И. Серов, Т.К. Амеров. – К.: Наук. думка, 1989. – 339 с.
6. Фушич В.И. Симметричный анализ и точные решения уравнений нелинейной математической физики / В.И. Фушич, В.М. Штелень, Н.И. Серов. – К.: Наук. думка, 1989. – 339 с.
7. Akhatov I.S. Nonlocal symmetries. Heuristic approach. / I.S. Akhatov, R.K. Gazizov, N.H. Ibragimov // J. Sov. Math. – 55 (1991). – P. 1401-1450.
8. King J.R. Some non-local transformations between nonlinear diffusion equation / J.R. King // Journal of Mathematical Physics. – 1990. – V. 23 – P. 5441-5464.

REFERENCES

1. Kamke, E. (1965), *Handbook of ordinary differential equations*, Nauka, Moscow, 704 p.
2. Ovsyannikov, L.V. (1978), *Group analysis of differential equations*, Nauka, Moscow, 400 p.
3. Ovsyannikov, L.V. (1959), "Group properties of the equations of nonlinear heat conductivity", *Reports of the USSR AS*, Vol. 125, pp. 492-495.
4. Olver, P. (1989), *Applications of Lie groups to differential equations*, Mir, Moscow, 581 p.
5. Fushchych, V.I., Serov, N.I. and Amer, T.K. (1989), On nonlocal ansatzes for one nonlinear one-dimensional heat equation, *Naukova dumka*, Kyiv, 339 p.
6. Fushchych, V.I., Shtelyon, V.M. and Serov, N.I. (1989), *Symmetric analysis and exact solutions of equations of nonlinear mathematical physics*, Naukova dumka, Kyiv, 339 p.
7. Akhatov, I.S., Gazizov, R.K. and Ibragimov, N.H. (1991), "Nonlocal symmetries. Heuristic approach", *J. Sov. Math*, 55, pp. 1401-1450.
8. King, J.R. (1990), "Some non-local transformations between nonlinear diffusion equation", *Journal of Mathematical Physics*, Vol. 23, pp. 5441-5464.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. В. Козелков,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.05.2018

Точные решения нелинейного (1+2)-измерного уравнения реакции-конвекции-диффузии

Ю. В. Приставка

Предметом изучения в статье является применение ливвського метода к построению инвариантных анзацов, редукции и нахождения точных решений (1+2)-измерного уравнения реакции-конвекции-диффузии. **Цель** - осуществить построение точных решений (1+2)-измерного уравнения реакции-конвекции-диффузии на основе использования симметричного свойств этого уравнения. **Задача** - использовать ливвську симметрию (1+2)-измерного уравнения реакции-конвекции-диффузии для построения инвариантных анзацев, редукции и нахождения его точных решений. Для реализации этой задачи использован метод Софуса Ли, в основе которого лежит принцип симметрии. Согласно методу С. Ли дифференциальные уравнения в частных производных, которые обладают классической ливвской симметрией, можно редуцировать к обыкновенным дифференциальным уравнениям с помощью специальных подстановок(анзацов). Решив редуцированные уравнения, можно построить точные решения исходного дифференциального уравнения в частных производных. **Выводы:** использовано симметричные свойства (1+2)-измерного уравнения реакции-конвекции-диффузии для построения инвариантных анзацов, редукции и нахождения его точных решений.

Ключевые слова: (1+2)-измерное уравнения реакции-конвекции-диффузии, симметрия, метод Ли, максимальная алгебра инвариантности, инвариантный анзац, редуцирована система, точные решения.

Exact solutions of (1+2)-dimensional nonlinear equation of reaction-convection-diffusion

Yu. Prystavka

The subject of study in the article is the application of the Lie's method to the construction of invariant ansatzes, the reduction and the finding of exact solutions (1+2)-dimensional equation of reaction-convection-diffusion. **The goal** is to construct exact solutions (1+2)-dimensional equation of reaction-convection-diffusion based on the use of symmetric properties of this equation. **The problem** is to use the Lie's symmetry of (1+2)-dimensional equation of the reaction-convection-diffusion for constructing invariant ansatzes, reduction and finding its exact solutions. For the realization of this problem the method of Sophus Lie is used, which based on the principle of symmetry. According to the method of S. Lie, differential equations with partial derivatives possessing classical Lie's symmetry can be reduced to ordinary differential equations with the help of special substitutions (ansatzes). We can construct exact solutions of the initial differential equation with partial derivatives, having solved the reduced equations. **Conclusions:** symmetric properties of (1+2)-dimensional reaction-convection-diffusion for the construction of invariant ansatzes, the reduction and the finding of its exact solutions.

Keywords: (1+2)-dimensional equation of reaction-convection-diffusion, symmetry, the method of Lie, maximal invariance algebra, invariant ansatz, reduced system, exact solutions.

Я. Рахими, И. В. Шостак, Е. И. Феоктистова

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

НЕЧЕТКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ПОЛНОЙ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТАВОК СУХОФРУКТОВ В УКРАИНУ

Рассмотрена задача выбора рационального вида транспорта для организации перевозок сырья, материалов и готовой продукции в рамках организации полной логистической цепи поставок сухофруктов (ЦПС) на рынок Украины из различных регионов мира. Показано, что задача выбора транспорта при реализации различных участков ЦПС характеризуется высоким уровнем неопределенности, порождаемым, главным образом, нечеткостью информации об основных факторах, которые определяют эффективность функционирования ЦПС. Предложено для синтеза модели выбора вида транспорта в ЦПС использовать математический аппарат нечеткой логики. Описана нечеткая модель выбора оптимального вида транспорта на основе критерия минимума времени и стоимости доставки. Приведен иллюстративный пример выбора оптимального вида транспорта для обслуживания условного участка ЦПС. В соответствии с принципом многомодельности, было построено две альтернативных нечетких модели - на основе операций (max-min) – композиции и (max-prod)-композиции. Совпадение результатов применения этих моделей дало основание для выбора автомобильного вида транспорта как оптимального для перевозок сухофруктов от производителя к оптовому покупателю.

Ключевые слова: поддержка принятия решений, поставки сухофруктов, логистическая система, транспортная логистика, цепи поставок, нечеткое моделирование.

Введение

Взаимодействие участников цепи поставок сухофруктов в Украину (ЦПС) бизнес процессов в ЦПС отражается множеством материальных, финансовых и информационных потоков, а также потоков услуг от источников исходного сырья до конечного потребителя. Многообразие регионов мира, из которых осуществляются поставки в Украину сухофруктов, широкая номенклатура поставляемой продукции, урожайность, колебание курсов валют, сезонность являются причинами возникновения высокого уровня неопределенности в процессах формирования и принятия решений участниками ЦПС.

Одним из главных факторов, определяющих эффективность функционирования ЦПС, является рациональная организация перевозок внутри цепи. Ключевая роль транспортировки в логистике ЦПС объясняется не только большим удельным весом транспортных расходов в общем составе логистических издержек, но и тем, что без транспортировки невозможно само существование цепи поставок.

Значительная часть логистических операций в ЦПС от первичного источника сырья до конечного потребления осуществляется с применением различных транспортных средств. Затраты на выполнение этих операций составляют до 50% от суммы общих затрат на логистику.

На выбор транспортного средства при формировании ЦПС оказывает влияние: характер груза (вес, объем, консистенция); количество отправляемых партий (используемый контейнер); срочность доставки груза заказчику; местонахождение пункта назначения с учетом погодных, климатических, сезонных характеристик; расстояние, на которое перевозится груз; ценность груза (страхование); близость расположения точки доставки к транспортным коммуникациям; сохранность груза, невыполнение

поставок [1, 2]. Цель статьи состоит в описании процесса синтеза нечеткой модели выбора вида транспорта для обеспечения эффективных перевозок внутри логистической цепи поставок сухофруктов в Украину, по критериям минимума транспортных издержек и времени доставки грузов.

Применение такой модели для поддержки принятия решений менеджерами ЦПС даст возможность снизить вероятность принятия ими нерациональных решений.

Основная часть

Основой выбора вида транспорта, оптимального для конкретной перевозки, служит информация о характерных особенностях различных видов транспорта (автомобильного, железнодорожного, морского, воздушного).

Рассмотрим преимущества и недостатки использования транспортных средств, с точки зрения организации ЦПС (табл. 1) [1].

Для определения вида транспорта для перевозки сухофруктов необходим учет шести главных факторов, влияющих на принятие решений: время доставки; стоимость перевозки; надежность соблюдения графика доставки груза; частота отправок; способность перевозить разные грузы; способность доставить груз в любую точку.

В процессе осуществления закупок и доставки материальных ресурсов внутри ЦПС, а также дистрибуции готовой продукции потребителям фирма - производитель может использовать различные виды транспорта, различных логистических партнеров, а также различные варианты транспортировки [3-5].

Проведем выбор оптимального вида транспорта для формирования ЦПС, считая при этом критерием оптимальности время доставки и стоимость доставки. Выбор вида транспорта будем осуществлять с использованием методов искусственного интеллекта, а именно нечеткого моделирования.

Таблиця 1. Переваги та недоліки видів транспорту, застосовуваних в ЦПС

Вид транспорту	Переваги	Недоліки
Автомобільний	а) висока маневренність; б) доставка «от дверей до дверей» з необхідною ступенем швидкості; в) регулярність поставок; г) можливість поставок малими партіями; д) найменш жорсткі вимоги до упаковки товару.	а) висока вартість перевезень; б) швидкість розвантаження; в) можливість хищення вантажу та угона автотранспорту; г) порівняно мала вантажопідйомність і др.
Залізничний	а) перевезення великих партій вантажів при будь-яких погодних умовах; б) порівняно швидка доставка вантажу на велике відстані; в) регулярність перевезень; г) зручна організація погрузочно-розгрузочних робіт; д) порівняно невисока собівартість перевезень вантажів, наявність знижок.	а) мала швидкість переміщення; б) обмежене число перевізників; в) хищення та втрати; г) невелика можливість доставки до пунктів споживання.
Морський	а) низькі вантажні тарифи; б) висока провозна спроможність і др.	а) низька швидкість; б) обмежена можливість доставки до пунктів споживання; в) жорсткі вимоги до упаковки та кріпленню вантажів; г) мала частота відправок; д) залежність від погодних та навігаційних умов.
Воздушний	а) найбільш висока швидкість доставки; б) можливість доставки в віддалені райони; в) висока збереженість вантажів.	а) високі вантажні тарифи; б) обмеженість розміру партії; в) залежність від метеорологічних умов (приводить до непередбачуваності графіків поставок).

Як правило, апарат теорії нечітких відношень використовується при якісному аналізі взаємозв'язків між об'єктами досліджуваної системи, коли зв'язки несуть дихотомічний характер і можуть бути проінтерпретовані в термінах "зв'язок присутній", "зв'язок відсутній", або коли методи кількісного аналізу взаємозв'язків по якимсь чи причинам неприменимі і взаємозв'язки штучно приводяться до дихотомічного виду. Наприклад, коли величина зв'язку між об'єктами приймає значення з рангової шкали, вибір порога на силу зв'язку дозволяє перетворити зв'язок до потрібного виду.

Оскільки кожне нечітке відношення представляє собою нечітке множинство, то застосовуючи до нечітких відношень операції, які застосовують для нечітких множинств. Над нечіткими відношеннями виконуються операції алгебраїчного множення (формула (1)) і алгебраїчна сума (формула (2)) [7].

$$\mu_{Q \cdot R}(x, y) = \mu_Q(x, y) \times \mu_R(x, y); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu_{Q+R}(x, y) &= \\ &= \mu_Q(x, y) + \mu_R(x, y) - \mu_Q(x, y) \cdot \mu_R(x, y), \end{aligned} \quad (2)$$

де $\mu_Q(x, y)$ – функція належності відношення Q ; $\mu_R(x, y)$ – функція належності відношення R .

Нехай Q і R – скінченні або нескінченні бінарні нечіткі відношення. При цьому нечітке відношення $Q = \{ \langle x_i, x_j \rangle, \mu_Q(\langle x_i, x_j \rangle) \}$ задано на декартовому

множинстві універсумів $X_1 \times X_2$, а нечітке відношення $R = \{ \langle x_j, x_k \rangle, \mu_R(\langle x_j, x_k \rangle) \}$ – на декартовому множинстві універсумів $X_2 \times X_3$.

Нечітке бінарне відношення, задане на декартовому множинстві $X_1 \times X_3$ і позначене через $Q \cdot R$, називається композицією бінарних нечітких відношень Q і R , а його функція належності визначається наступним виразом [7]:

$$\begin{aligned} \mu_{Q \cdot R}(\langle x_i, x_k \rangle) &= \\ &= \max_{x_j \in X_2} \left\{ \min \left\{ \mu_Q(\langle x_i, x_j \rangle), \mu_R(\langle x_j, x_k \rangle) \right\} \right\} \quad (3) \\ &(\forall \langle x_i, x_k \rangle \in X_1 \times X_3). \end{aligned}$$

Визначену таким чином композицію бінарних нечітких відношень називають (max-min) – композицією або сверткою нечітких відношень, її також можна записати в наступному вигляді [7]:

$$\begin{aligned} \mu_{Q \cdot R}(\langle x_i, x_k \rangle) &= \\ &= \bigvee_{x_j \in X_2} \left(\mu_Q(\langle x_i, x_j \rangle) \wedge \mu_R(\langle x_j, x_k \rangle) \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Для (max-min) – композиції відношень Q і R операцію \wedge можна замінити будь-якою іншою, для якої виконуються ті ж обмеження, що і для \wedge : асоціативність і монотонність по кожному аргументу. Тоді:

$$\begin{aligned} \mu_{Q \cdot R}(\langle x_i, x_k \rangle) &= \\ &= \bigvee_{x_j \in X_2} \left(\mu_Q(\langle x_i, x_j \rangle) \times \mu_R(\langle x_j, x_k \rangle) \right). \end{aligned} \quad (5)$$

В частности, операция \wedge может быть заменена алгебраическим умножением, тогда говорят о (max-prod)-композиции.

Произведем выбор вида транспорта для поставки сырья и материалов от поставщиков до производителя сухофруктов. С этой целью построим нечеткую модель, основанную на двух бинарных нечетких отношениях S и T . Первое из этих нечетких отношений строится на двух базисных множествах X и Y , а второе – на двух базисных множествах Y и Z . Здесь X описывает множество видов транспорта, по которым может быть осуществлена перевозка, Y – множество вариантов транспортировок, а Z – множество факторов, которые характеризуют перевозки. Нечеткое отношение S содержательно описывает связь вида транспорта с вариантом транспортировки, а T описывает оценку различных вариантов транспортировки по каждому из факторов.

Для конкретности:

- а) $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$;
- б) $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6\}$;
- в) $Z = \{z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6\}$.

Элементы универсумов имеют следующий содержательный смысл:

- а) x_1 – «железнодорожный транспорт», x_2 – «автомобильный транспорт», x_3 – «водный транспорт», x_4 – «трубопроводный транспорт», x_5 – «воздушный транспорт», x_6 – «морской транспорт»;
- б) y_1 – «униmodalная», y_2 – «смешанная», y_3 – «комбинированная», y_4 – «интервокальная», y_5 – «терминальная», y_6 – «мультиmodalная»;
- в) z_1 – «время доставки», z_2 – «частота отправлений», z_3 – «надёжность соблюдения графиков», z_4 – «способность перевозить разные грузы», z_5 –

«способность перевозить грузы в любую географическую точку», z_6 – «стоимость перевозки».

Конкретные значения функций принадлежности $\mu_S(\langle x_i, y_j \rangle)$ и $\mu_T(\langle y_j, z_k \rangle)$ рассматриваемых нечетких отношений представлены табл. 2 и 3.

Матрицы этих нечетких отношений имеют вид:

$$M_S = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,2 & 0,3 & 0,3 \\ 0,1 & 0,8 & 0,8 & 0,3 & 0,7 & 0,5 \\ 0,8 & 0,7 & 0,8 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,3 & 0,3 & 0,2 & 0,2 & 0,2 & 0,2 \\ 0,8 & 0,3 & 0,4 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,1 & 0,8 & 0,9 & 0,4 & 0,7 & 0,5 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$M_T = \begin{bmatrix} 0,8 & 0,6 & 0,4 & 0,3 & 0,3 & 0,3 \\ 0,4 & 0,6 & 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,5 \\ 0,3 & 0,7 & 0,7 & 0,9 & 0,3 & 0,6 \\ 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,8 & 0,9 & 0,7 \\ 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,8 & 0,9 & 0,8 \\ 0,4 & 0,5 & 0,6 & 0,8 & 0,9 & 0,7 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Поскольку рассматриваемые нечеткие отношения удовлетворяют формальным требованиям, необходимым для выполнения их нечеткой композиции согласно формуле (4), результат операции нечеткой композиции этих отношений может быть представлен в виде матрицы результирующего нечеткого отношения:

$$M_{S \circ T} = \begin{bmatrix} 0,5 & 0,6 & 0,5 & 0,7 & 0,3 & 0,5 \\ 0,4 & 0,7 & 0,7 & 0,8 & 0,7 & 0,7 \\ 0,8 & 0,7 & 0,7 & 0,7 & 0,3 & 0,6 \\ 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,3 & 0,7 \\ 0,8 & 0,6 & 0,4 & 0,4 & 0,3 & 0,3 \\ 0,4 & 0,7 & 0,7 & 0,9 & 0,7 & 0,7 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Представим нечеткую композицию двух исходных отношений в виде табл. 4.

Таблица 2. Матрица нечетких отношений S

Тип транспорта	Варианты транспортировки					
	Униmodalная	Смешанная	Комбинированная	Интерmodalная	Терминальная	Мультиmodalная
Железнодорожный	0,5	0,7	0,3	0,2	0,3	0,3
Водный	0,1	0,8	0,8	0,3	0,7	0,5
Автомобильный	0,8	0,7	0,8	0,3	0,3	0,3
Воздушный	0,8	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3
Морской	0,1	0,8	0,9	0,4	0,7	0,5

Таблица 3. Матрица нечетких отношений T

Варианты транспортировки	Факторы, характеризующие перевозку					
	Время доставки	Частота отправлений	Надёжность соблюдения графиков	Способность перевозить разные грузы	Способность перевозить грузы в любую географическую точку	Стоимость перевозки
Униmodalная	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3
Смешанная	0,4	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5
Комбинированная	0,3	0,7	0,7	0,9	0,3	0,6
Интерmodalная	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	0,7
Терминальная	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	0,8
Мультиmodalная	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	0,7

Таблиця 4. Композиція нечетких відношень

Варианти транспортування	Фактори, характеризують перевезку					
	Время доставки	Частота отправок	Надійсність виконання графіків	Спосібність перевозити різні вантажі	Спосібність перевозити вантажі в будь-яку географічну точку	Вартість перевезки
Залізничний	0,5	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5
Водний	0,4	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7
Автомобільний	0,8	0,7	0,7	0,7	0,3	0,6
Воздушний	0,8	0,6	0,4	0,4	0,3	0,3
Морський	0,4	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7

Розглянемо, яким чином отримується одне з значень функції належності композиції, наприклад, значення $\mu_{S^*T}(\langle x_1, z_1 \rangle) = 0,5$. Впочатку знайдемо мінімальні значення функції належності всіх пар елементів першої строки табл. 2 і першого стовпця табл. 3:

$$\min\{0,5\ 0,8\}=0,5; \min\{0,7\ 0,4\}=0,4;$$

$$\min\{0,3\ 0,3\}=0,3; \min\{0,2\ 0,4\}=0,2;$$

$$\min\{0,3\ 0,4\}=0,3; \min\{0,3\ 0,4\}=0,3.$$

Після цього знайдемо максимальне з 6 отриманих значень, яке і буде являється іскомим значенням функції належності:

$$\mu_{S^*T}(\langle x_1, z_1 \rangle) = \max\{0,5\ 0,4\ 0,3\ 0,2\ 0,3\ 0,3\} = 0,5.$$

Інші значення функції належності знаходяться аналогічно.

Табл. 4 показує оцінку видів транспорту по множині факторів. Проаналізувавши отриманий результат, можна вибрати транспорт для перевезки всередині ЦПС. Оскільки основними критеріями оптимальності були вибрані час доставки і вартість доставки, найбільш підходящим буде, в даному випадку, використання автомобільного транспорту, оскільки функції належності рівні відповідно:

$$\mu_{S^*T}(\langle x_3, z_1 \rangle) = 0,8, \mu_{S^*T}(\langle x_3, z_6 \rangle) = 0,6.$$

Для підтвердження отриманого результату, застосуємо альтернативну операцію композиції двох бінарних нечетких відношень - (max-prod)-композиції (формула (5)).

Результат операції нечеткої композиції представлений в вигляді табл. 5.

Таблиця 5. Нечеткая (max-prod)-композиція двох нечетких відношень

Варианти транспортування	Фактори, характеризують перевезку					
	Время доставки	Частота отправок	Надійсність виконання графіків	Спосібність перевозити різні вантажі	Спосібність перевозити вантажі в будь-яку географічну точку	Вартість перевезки
Залізничний	0,40	0,42	0,35	0,49	0,27	0,35
Водний	0,32	0,56	0,56	0,72	0,63	0,56
Автомобільний	0,64	0,56	0,56	0,72	0,27	0,48
Воздушний	0,64	0,48	0,32	0,36	0,27	0,24
Морський	0,32	0,63	0,63	0,81	0,63	0,56

Слідуючи загальним рекомендаціям прикладного системного аналізу стосовно принципу багатомодельності, можна зробити наступний висновок.

При використанні різних моделей отримані однакові результати; цей факт свідчить про наявність стійкої зв'язки або закономірності між окремими елементами моделей.

Застосовуючи до розглянутих нечетких моделей співпадіння результатів, отриманих на основі операцій (max-min) – композиції і (max-prod)-композиції, дає підставу для більш впевнених висновків стосовно вибору автомобільного виду транспорту для транспортування сухофруктів від виробника до оптового покупця.

Висновки

На основі викладеного вище матеріалу можна зробити наступні висновки:

1. Задача вибору раціонального виду транспорту для організації перевезки сировини, матеріалів і готової продукції в межах організації повної логістичної ланки поставок сухофруктів на ринок України, є одним з головних факторів, що визначають ефективність функціонування такої ланки.

2. Високий рівень невизначеності в прийнятті рішень по організації ЦПС, носить переважно нечеткий характер.

3. Модель вибору виду транспорту для здійснення перевезки в межах ЦПС, цілеспрямовано реалізувати на основі математичного апарату нечеткої логіки.

4. Описана нечетка модель вибору оптимального виду транспорту на основі критерію мінімуму часу і вартості доставки.

5. Приведено ілюстративний приклад вибору оптимального виду транспорту для обслуговування умовного ділянки ЦПС.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бродецкий Г. Л. Моделирование логистических систем. Оптимальные решения в условиях риска / Г. Л. Бродецкий. – М.: Вершина, 2006. – 376 с.
2. Рахими Я. Знаниеориентированный подход к организации поддержки принятия решений по формированию полной логистической цепи поставок сухофруктов в Украину [Текст] / Я. Рахими // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава : ПНТУ, 2017. – Вип. 6 (46). – С. 197-201.
3. Вагнер М. Штефан. Управление поставщиками / Вагнер М. Штефан. – М.: КИА центр, 2006. – 128 с.
4. Беспалов Р. С. Транспортная логистика. Новейшие технологии построения эффективной системы доставки / Р. С. Беспалов. – М.: Вершина, 2007. – 384 с.
5. Корпоративная логистика в вопросах и ответах / Под ред. проф. В.И. Сергеева. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2017. – 180 с.
6. Бауэрсокс Д. Дж. Логистика: интегрированная цепь поставок / Д. Дж. Бауэрсокс, Д. Дж. Клосс. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. – 640 с.
7. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 798 с.

REFERENCES

1. Brodetsky, G.L. (2006), *Modeling of logistics systems. Optimal solutions under risk conditions*, Vershina, Moscow, 376 p.
2. Rahimi, Ya. (2017), "Knowledge of an oriented approach to the organization of decision-making support for the formation of a complete logistics chain of supplies of dried fruits to Ukraine", *Systems of control, navigation and communication*, PNTU, Poltava, No. 6 (46), pp. 197-201.
3. Wagner, M. Stefan. (2006), *Supplier management*, KIA Center, Moscow, 128 p.
4. Bespalov, R.S. (2007), *Transport logistics. The newest technologies for building an effective delivery system*, Vershina, Moscow, 384 p.
5. Sergeeva, V.I. (2017), *Corporate logistics in questions and answers*, SRC INFRA-M, Moscow, 180 p.
6. Bowersox, D.J. and Closs D.J. (2008), *Logistics: an integrated supply chain*, ZAO Olimp-Business, Moscow, 640 p.
7. Pegat, A. (2011), *Fuzzy modeling and control*, BINOM. Laboratory of Knowledge, Moscow, 798 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. Г. Чухрай,
Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «ХАІ», Київ
Received (Надійшла) 14.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.05.2018

**Нечітке моделювання транспортної складової
повного логістичного ланцюга поставок сухофруктів в Україні**

Яшар Рахімі, І. В. Шостак, О. І. Феоктистова

Розглянуто задачу вибору раціонального виду транспорту для організації перевезень сировини, матеріалів і готової продукції в рамках організації повного логістичного ланцюга поставок сухофруктів (ЛПС) на ринок України з різних регіонів світу. Показано, що задача вибору транспорту при реалізації різних ділянок ЛПС характеризується високим рівнем невизначеності, що породжується, головним чином, нечіткістю інформації про основні чинники, які визначають ефективність функціонування ЛПС. Запропоновано для синтезу моделі вибору виду транспорту в ЛПС використовувати математичний апарат нечіткої логіки. Описана нечітка модель вибору оптимального виду транспорту на основі критерію мінімуму часу і вартості доставки. Наведено ілюстративний приклад вибору оптимального виду транспорту для обслуговування умовної ділянки ЛПС. Відповідно до принципу багатомодельності, було побудовано дві альтернативні нечіткі моделі - на основі операцій (max-min) - композиції і (max-prod) - композиції. Збіг результатів застосування цих моделей дав підставу для вибору автомобільного виду транспорту як оптимального для перевезень сухофруктів від виробника до оптового покупця.

Ключові слова: підтримка прийняття рішень, поставки сухофруктів, логістична система, транспортна логістика, ланцюги поставок, нечітке моделювання.

**Fuzzy transport component modelling
of the full logistic chain of the dried fruits supply to Ukraine**

Yashar Rahimi, I. Shostak, O. Feoktystova

The problem of choosing a rational mode of transport for organization of transportation of raw materials, materials and finished products within the framework of the organization of a complete logistic chain of deliveries of dried fruits (CDDF) to the Ukrainian market from various regions of the world is considered. It is shown that the task of selecting transport in the implementation of various sections of the CDDF is characterized by a high level of uncertainty, generated mainly by the vagueness of information on the main factors that determine the efficiency of the CDDF. It is proposed to use the mathematical apparatus of fuzzy logic to synthesize the model of the transport mode choice in the CDDF. A fuzzy model for choosing the optimal mode of transport is described on the basis of the criterion of minimum time and cost of delivery. An illustrative example of choosing the optimal mode of transport for servicing the conditional section of the CDDF is given. In accordance with the principle of multi-model, two alternative fuzzy models were constructed - based on operations (max-min) - compositions and (max-prod) - compositions. The coincidence of the results of application of these models provided the basis for choosing a car type of transport as optimal for transportation of dried fruits from the producer to the wholesale buyer.

Keywords: support of decision-making, delivery of dried fruit, logistics system, transport logistics, supply chains, fuzzy modeling.

С. П. Алёшин, Е. А. Бородина

Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, Полтава, Украина

НЕЙРОСЕТЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ФИСКАЛЬНО-НАЛОГОВОЙ НАГРУЗКИ КАК ЭЛЕМЕНТ ЦИФРОВИЗАЦИИ ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА

Целью статьи является разработка технологии построения нейросетевых моделей автоматического мониторинга состояния налоговой нагрузки для достижения оптимального баланса между возможностью развития успешного бизнеса и достаточным наполнением регионального бюджета. **Методика.** Для проведения исследований был использован многослойный перцептрон, применен алгоритм обратного распространения, а также технология нейрорегулирования. **Результаты.** Произведена автоматизация процесса определения элементов вектора градиента при реализации традиционного метода обратного распространения ошибки с помощью применения технологии нейрорегулирования. **Научная новизна.** Впервые предложено решение оптимизации фискально-налоговой нагрузки (ФНН) региона с применением алгоритма обратного распространения. **Практическое значение.** Использование предложенной методики позволит создать программный инструментарий для перехода к автоматической системе оптимального управления экономикой.

Ключевые слова: нейронная сеть, нейросетевая оптимизация, фискально-налоговая нагрузка, цифровизация, экономика региона.

Введение

В современных условиях, когда набирает силу новый технологический уклад, основанный на внедрении в производство и управление новых информационных технологий (нанотехнологии, микробиология, искусственный интеллект, тотальные компьютерные коммуникации и др.) представляется своевременной задачей автоматизации контроля и управления фискально-налоговой нагрузкой (ФНН) региона. Это вытекает из необходимости постоянного поиска компромисса в пространстве динамичных параметров и состояний в системе налогообложения и контроля для оптимального роста экономики.

Действительно, экономическая ситуация в регионе существенно зависит всего от одного фактора. Этот фактор – налогово-административная нагрузка на бизнес. Если нагрузку сделать минимальной и таким образом полностью снять с бизнеса всю налоговую и административную нагрузку, то произойдет расцвет бизнеса в регионе.

Но в этом случае, администрации региона, оставшейся без налогов, нечем будет ремонтировать дороги, платить зарплаты учителям, содержать аппарат управления.

Если налогово-административную нагрузку максимизировать и наложить на бизнес непосильную налоговую и административную нагрузку, то бизнес умрет или уйдет в «тень». Налоги опять не будут.

Выход такой – найти и постоянно удерживать оптимальное значение налогово-административной нагрузки на бизнес (величину платежей, отчетов, проверок, штрафов и т.д.), при которой будет достигнут оптимальный баланс между возможностью бизнеса успешно развиваться и достаточным наполнением регионального бюджета.

Это решаемая проблема, если подойти к ее преодолению как к решению задачи нелинейной оптимизации в многомерном пространстве факторов и состояний высокой размерности [1, 2]. При этом необходимо выделить экспертным путем информативные факторы, поставить их в соответствие со значениями налогово-административной нагрузки на примерах предыстории (ретроспективные данные), а строгие аналитические связи установить и зафиксировать путем принудительного обучения нейросетевых моделей на ретроспективной выборке.

Таким образом, предметный эксперт описывает задачу на вербальном уровне в терминах фискально-налоговой парадигмы, а формализацию задачи и ее инструментальное решение – специалист по нейросетевым технологиям.

Современные программные платформы (Matlab, Statistica и др.) инструментарий, позволяет оперативно конструировать нейросетевую среду, реализовать широкий класс архитектур нейросетей различной сложности и правил модификации весовых коэффициентов в процессе принудительного обучения [3]. Вместе с тем, применение технологии искусственного интеллекта в управлении сложными объектами требует учитывать особенности каждой предметной области, универсальных решений нет и этот факт раскрывает необходимость адаптации набора стандартных опций соответствующего пакета технического анализа к конкретной области исследования.

Выбор аналитического инструментария обусловлен неоспоримыми и важными для практического использования преимуществами:

- нейросети являются адаптивными обучающимися системами, извлекающими на примерах информацию из реальных процессов, которые динамически промоделировать достаточно трудно, а за-

частую, просто невозможно, т.к. они часто содержат значительный массив скрытых, неконтролируемых, неполных и зашумленных параметров и взаимных связей между ними;

- их применение позволяет решать задачи, которые трудно или невозможно решить традиционными методами в силу отсутствия формализованных математических описаний процессов функционирования;

- обладают ассоциативной памятью и в процессе работы накапливают и обобщают информацию, от чего эффективность их со временем возрастает;

- их использование базируется на обучении нейросети для извлечения информации из опытных данных, что обеспечивает объективность результатов и повышает их надежность и достоверность.

Степень разработанности проблемы

Разработкой, теоретическим обоснованием и внедрением информационных технологий для цифровизации экономики занимались отечественные и зарубежные ученые, в частности: С. Хайкин, Р. Хехт-Нильсен, Т. Кохонен, и др. [4, 5].

В результате их деятельности созданы:

- основополагающие принципы и методы прикладной теории искусственного интеллекта в социальных и технических системах;

- конструктивные подходы к проектированию и моделированию сложных социальных систем;

- прикладная теория управления социальными и производственными системами;

- концепция применения систем поддержки принятия решений для объектов повышенного риска;

- методы и алгоритмы многоуровневой дифференциальной диагностики в различных предметных областях;

- алгоритмические и программные продукты для оперативного многофакторного анализа данных в задачах классификации, прогноза и адаптации входов к состояниям объекта;

- комплексная квалиметрия базовых процессов сложных объектов.

Вместе с тем, полноценной, комплексной и эффективной программной базы автоматизации мониторинга фискально-налоговой нагрузки на сегодня в открытых публикациях не зафиксировано. Такая ситуация требует создания продуктивных технологий и программного обеспечения построения моделей, позволяющих автоматизировать процессы распознавания состояний, прогнозирования динамики поведения и выбор оптимальных управляющих факторов для обеспечения оптимального экономического климата через влияние на налогово-административную систему на базе интеллектуальных технологий [4, 5].

Цель исследования и постановка задачи

Цель исследования: разработать технологию построения продуктивного ансамбля нейросетевых моделей автоматического мониторинга состояния налоговой нагрузки и продуктивного поиска оптимального соотношения входных факторов и целевых

состояний. Конечным продуктом должны стать нейросетевые модели распознавания актуальных состояний и нахождения такого набора входных факторов, который надежно и быстро позволил бы привести всю систему в требуемое состояние.

Необходимо найти аналитические отображения входного вектора данных на результат оценки актуального состояния ФНН региона и обеспечить строгое функциональное влияние этого вектора на целевое состояние ФНН.

Задача сводится к решению прямой и обратной задачам распознавания классов.

В общем случае признаки поведения и число классов ФНН являются векторными величинами:

$$|Y(t)| = F |X(t)|, \quad (1)$$

где $Y(t)$ – номер класса состояния ФНН; $X(t)$ – вектор текущих значений входных факторов-признаков; F – функционал преобразования массива входных признаков в номер класса.

Задача адаптации входного вектора к требуемому состоянию ФНН состоит в нахождении оптимального набора входного вектора факторов $X_0(t)$, соответствующего вектору целевого состояния $Y_0(t)$ ФНН. Этот процесс может быть формально представлен процедурой:

$$F_0 : Y_0(t) \rightarrow X_0(t), \quad (2)$$

где $Y_0(t)$ – целевой вектор состояния объекта; $X_0(t)$ – вектор адаптированных значений входных признаков; F_0 – продуктивный функционал модификации массива текущих входных факторов к искомому набору, адекватному целевому состоянию.

Реализация алгоритма (2) позволяет найти оптимальный набор входных факторов как последовательное решение прямой и обратной задачи распознавания состояний ССТС.

Решение обратной задачи в нейросетевом формате обеспечивает нахождение таких значений сигналов на входе обученной сети, при которых достигается выходное состояние, соответствующее нужному классу. В основу классификации (1) предлагается положить использование обучаемой искусственной нейронной сети с обратным распространением ошибки как инструмента автоматического распознавания состояния [6].

В основу поиска входных факторов ФНН, которые соответствуют ее целевому состоянию, предлагается положить технологию адаптации входов к требуемому состоянию на основе принципов нейрорегуляции [7]. В качестве инструмента моделирования выбран нейроэмулятор среды StatSoft.

Классификация актуальных состояний ФНН

Построение математической модели внутренней структуры индикаторов состояния ФНН на основе исходных данных входного множества факторов сводится к отображению пространства факторов

на пространство состояний с заданной надежностью и точностью:

$$F: X \rightarrow Y_{opt}, X \subset \mathfrak{R}^m, Y_{opt} \subset \mathfrak{R}, \quad (3)$$

где X – вектор признаков состояния ФНН; Y_{opt} – выходное значение класса состояния ФНН.

Массив признаков ФНН $X^n = \{x_1, \dots, x_n\} \subset X$ совместно с соответствующим массивом классов состояний ФНН позволяет реализовать известное правило распознавания образов [6]:

$$\omega_g \in \Omega_k, \text{ если } L(\omega, \{\omega_g\}) = \sup_i L(\omega, \{\omega_i\}),$$

$$L(\omega, \{\omega_g\}) \rightarrow \omega_g \in \Omega_k, \quad (4)$$

где $\vec{X} = \{x_1, \dots, x_n\} \in X$, $L(\omega, \{\omega_g\})$ – правило отнесения состояния ФНН ω_g к соответствующему классу; $\{\omega\}$ – множество состояний ФНН (p, g) в пространстве признаков (k, l) при всех их возможных сочетаниях $(\omega_{pk}, \omega_{gl})$.

Адаптация входных факторов к целевым состояниям

Если актуальное состояние ФНН не соответствует целевому состоянию, то необходимо найти соответствующий набор входных факторов, т.е. решить обратную задачу распознавания: по заданному классу ФНН найти определить набор признаков (факторов) адекватных этому состоянию. Формально невязка актуального и целевого состояний в нейросетевом формате формализуется в виде [7]:

$$\frac{1}{mn} \sum_{j=li=1}^n \sum_{m} (y_{ij} - d_{ij})^2 \Rightarrow (\mathfrak{R} \leq \mathfrak{R}_0), \quad (5)$$

Где y_{ij} – вектор индикаторов выходных состояний; d_{ij} – результат обучения сети на j - выходе, при i - м примере обучающей выборки; $j = 1, \dots, n$ – номер выхода сети; $j = 1, \dots, m$ – номер примера; m, n – размерность массива примеров и числа выходных элементов сети; \mathfrak{R}_0 – допустимые ограничения по условию задачи.

Решение задачи минимизации целевой функции (5) в постановке задачи выполняется итерационно в процессе обучения сети по алгоритму обратного распространения ошибки [7] применительно к входным факторам исследуемой ФНН:

- модификация синаптического пространства путем подстройки весовых коэффициентов в направлении антиградиента невязки:

$$w(t+1) = w(t) - \mu \left(\frac{\partial E}{\partial w} \right), \quad (5)$$

где μ – коэффициент обучения; E – функция невязки (ошибка).

Если Y представляет актуальное (текущее) со-

стояние ФНН, а Y^* – реакцию сети, то формально процесс адаптации представляется известным алгоритмом [7]:

- представляем ошибку сети как:

$$E^* = \frac{1}{2} (e^*)^2 = \frac{1}{2} (Y - Y^*)^2$$

Тогда

$$Y^* = f_{out}^e \left\{ \sum_{i=1}^{N_2} w_i^{e_2} f^{e_2} \left[\sum_{j=1}^{N_1} w_{ij}^{e_1} f^{e_1} (y_j^{e_1}) - b_i^{e_2} \right] - b_{out}^e \right\},$$

где $f_{out}^e(\cdot)$, $f^{e_2}(\cdot)$, $f^{e_1}(\cdot)$ – сигнальные (активационные) функции нейронов 2-го та 1-го слоев; $w_i^{e_2}$, $w_{ij}^{e_1}$ – весовые коэффициенты нейронов на участках между нейронами 2-3-го и 1-2-го слоев; $b_i^{e_2}$, b_{out}^e – величины порогов нейронов выхода и скрытого слоя.

Для нейронов на входе используется линейная сигнальная функция, а для скрытого слоя – сигмоидная. Порог на выходе обычно равен нулю.

Далее оценивается производная функции невязки и выполняются действия по известной методике [6].

Инструментально задача адаптации входов сети к ее целевому состоянию решена в парадигме существующих градиентных методов адаптации входного вектора к заданной функции на выходе [7].

В этом случае метод обратного распространения ошибки последовательно применяется в два этапа:

- для подстройки параметров нейронной сети при модификации её синаптического пространства;
- для подстройки входного вектора через градиент функции ошибки по входным сигналам сети.

Входные факторы ФНН, соответствующие ее требуемому классу, подавались на вход обученной сети. Имея заданный ответ и ответ выданный сетью, вычислялся градиент функции ошибки по входным сигналам сети по известной технологии метода нагруженных двойственных сетей [7].

Задача обучения НС имеет две фазы.

Первая – представляет усвоение начальных функций НЭ и НК, которые приближенно соответствуют динамике управляемого состояния фискально-налоговой нагрузки, а вторая – в поддержке адаптивного управления.

Структура взаимодействия факторов, ошибок и управляющих воздействий поясняет схема, приведенная на рис. 1.

После достижения необходимой точности автономной реакции НК проводится дополнительное обучение обеих нейросетей на примерах управления ФНН при различных ее значениях.

Вторая фаза обучения нейросетей системы нейроруления проходит в рабочем режиме управляемого объекта, что требует соблюдения строгого графика выполнения операций управления и коррекции параметров сетей.

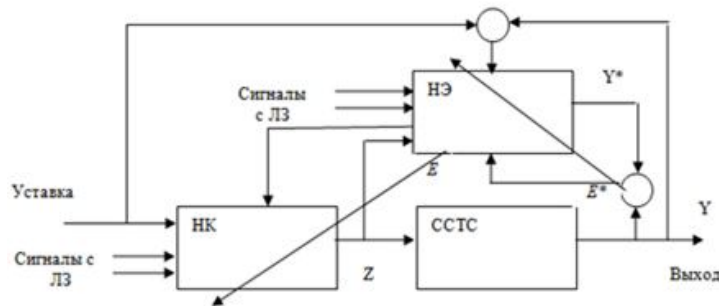


Рис. 1. Структурная схема адаптации

Каждая новая реализация пополняет обучающую выборку для оперативного обучения. Чтобы избежать потери полезной информации, что содержится в этой реализации, необходимо в течении одного такта выполнить достаточное количество эпох сетей. Таким образом, представлены математические, алгоритмические и инструментальные процедуры решения двух относительно самостоятельных процедур:

- построение адекватной модели текущего состояния исследуемого состояния ФНН;

- нахождение вектора входных факторов, соответствующего целевому состоянию в рамках допустимых отклонений.

Результаты моделирования градиентного спуска с оценкой частных производных как по параметрам сети, так и по входным сигналам, представляющим пространство признаков текущего состояния фискально-налоговой нагрузки, показало устойчивую сходимость итерационного процесса обучения сети с приемлемыми показателями качества.

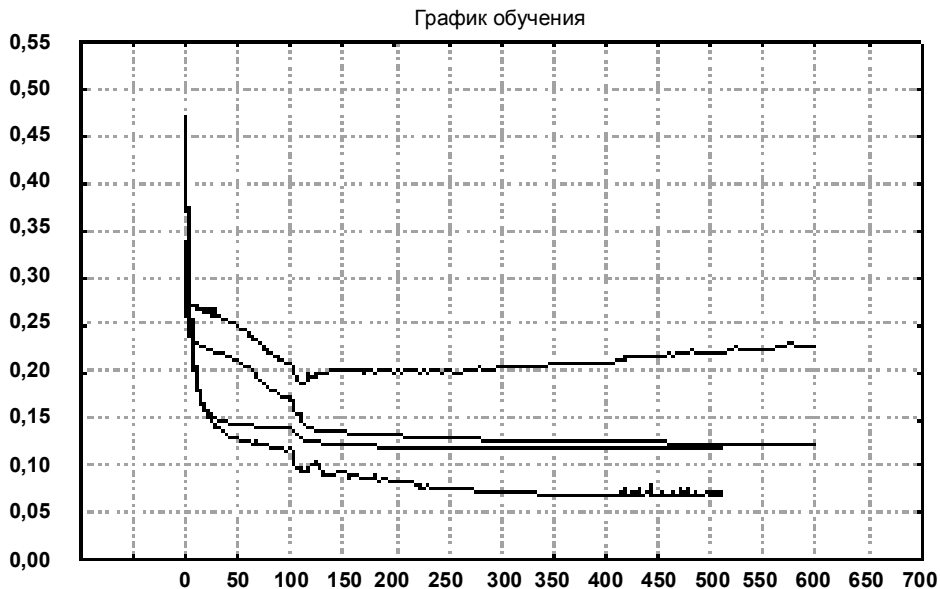


Рис. 2. Результат обучения моделей нейросетей

Для различных условий моделирования получен ансамбль продуктивных нейросетей, которые могут использоваться в отдельных приложениях на основе их сохранения в формате основного кода.

Интерпретация результатов моделирования

Адекватность нейросетевых моделей установленная по величине продуктивности, ошибкам на обучающих, контрольных и тестовых множествах при обучении на репрезентативной выборке примеров, позволяет утверждать о состоятельности принимаемых решений по результатам моделирования [1, 6, 7]. На практике это позволяет подтвердить возможность находить и постоянно удерживать оптимальное значение исследуемой налогово-административной нагрузки на бизнес (величину платежей,

отчетов, проверок, штрафов и т.д.), при которой будет достигнут оптимальный баланс между возможностью бизнеса успешно развиваться и достаточным наполнением регионального бюджета, что является целью исследования.

Выводы

1. Для автоматизации определения величин факторов, приводящих актуальное состояние ФНН к целевому, необходимо найти функциональную зависимость её состояний от значений факторов. Эта задача решена применением технологии нейрорегуляции и реализована моделями многослойных перцептронов как обратная задача распознавания.

2. Расчет частных производных по входным факторам выходной функции невязки текущего и требуемого состояний ФНН и обобщенная оценка

градиента виконані на основі відомих властивостей нейронних схем, функціонуючих в зв'язці «емулятор-контролер». Це дозволило автоматизувати процес визначення елементів вектора градиента при реалізації традиційного методу зворотного розповсюдженні помилки.

3. Практична значимість результатів дослідження полягає в створенні програмного інструментарія для переходу до автоматичним системам адаптації простору входних ознак до простору потрібних класів в системах оптимального управління економікою.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Алешин С. П. Нейронна база підтримки рішень в просторі факторів і станів високої розмірності / Полтава : Скайтек, 2013. – 208 с.
2. Алешин С. П. Нейронна контроль динаміки процесів як простору станів високої розмірності / С. П. Алешин, Е. А. Бородин // Вестник РГУПС. – 2013. – № 4. – С. 35 – 42.
3. Хайкин С. Нейронні мережі : Повний курс / С. Хайкин. – М.: Вільямс, 2006. – 1104 с.
4. Бусленко Н. П. Моделювання складних систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
5. Галушкин А. И. Нейрокомп'ютери і їх застосування на рубежі тисячоліть в Китаї / А. И. Галушкин. – М.: Горюча лінія – Телеком, 2004. – 464 с.
6. Нейронна розпізнавання класів в режимі реального часу [Електронний ресурс] / С. П. Алешин, Е. А. Бородин // Інженерний вестник Дона. – 2013. – № 1. – Режим доступу: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1494>.
7. Нейронна модифікація поточного простору ознак до цільової множини класів / А. Л. Ляхов, С. П. Алешин, Е. А. Бородин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2012. – № 4 (29). – С. 99 – 104.

REFERENCES

1. Aleshin, S.P. (2013), *Neural network basis for supporting solutions in the space of factors and high-dimensional states*, Skytake, Poltava, 208 p.
2. Aleshin, S.P. and Borodin, E.A. (2013), "Neural network control of the dynamics of processes as a space of high-dimensional states", *Vestnik of the RGUPS*, No. 4, pp. 35-42.
3. Khaikin, S. (2006), *Neural Networks: Full Course*, Williams, Moscow, 1104 p.
4. Buslenko, N.P. (1978), *Modeling of complex systems*, Nauka, Moscow, 400 p.
5. Galushkin, A.I. (2004), *Neurocomputers and their application at the turn of the millennium in China*, Goryachaya liniya – Telekom, Moscow, 464 p.
6. Aleshin, S.P. and Borodin, E.A. (2013), "Neural network class recognition in real time mode", *Engineering Bulletin of the Don*, No. 1, Access mode: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1494>.
7. Lyakhov, A.L., Aleshin, S.P. and Borodin, E.A. (2013), "Neural network modification of the current feature space to the target class set", *Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*, No. 4 (29), pp. 99-104.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І. В. Шостак,
Національний аерокосмічний університет імені М. С. Жуковського «ХАІ», Київ
Received (Надійшла) 7.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.05.2018

Нейромережева оптимізація фіскально-податкового навантаження як елемент цифровізації економіки регіону

С. П. Альошин, О. О. Бородин

Метою статті є розробка технології побудови нейромережевих моделей автоматичного моніторингу стану податкового навантаження для досягнення оптимального балансу між можливістю розвитку успішного бізнесу та достатнім наповненням регіонального бюджету. **Методика.** Для проведення досліджень був використаний багатосаровий перцептрон, застосований алгоритм зворотного поширення, а також технологія нейроуправління. **Результати.** Проведена автоматизація процесу визначення елементів вектора градиента при реалізації традиційного методу зворотного поширення помилки за допомогою застосування технології нейроуправління. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано рішення оптимізації фіскально-податкового навантаження регіону з застосуванням алгоритму зворотного поширення. **Практичне значення.** Використання запропонованої методики дозволить створити програмний інструментарій для переходу до автоматичної системи оптимального управління економікою.

Ключові слова: нейронна мережа, нейромережева оптимізація, фіскально-податкове навантаження, цифровізація, економіка регіону.

Neural network optimization of fiscal-tax burden as an element of region's economy digitalization

S. Alyoshin, E. Borodina

The purpose of the article is to develop a technology for constructing neural network models for automatic monitoring of the tax burden to achieve an optimal balance between the possibility of developing a successful business and sufficient filling of the regional budget. **Methodology.** A multilayer perceptron was used for the research, an algorithm for back propagation was used, as well as a neuro management technology. **Results.** Automated the process of determining the elements of the gradient vector in the implementation of the traditional method of back propagation of the error using the technology of neural control. **Originality.** For the first time, a solution to optimize the fiscal and tax burden of the region with the application of the back propagation algorithm was proposed. **Practical value.** Using the proposed methodology will create a software tool for the transition to an automatic system for optimal management of the economy.

Keywords: neural network, neural network optimization, fiscal and tax burden, digitalization, regional economy.

A. Berdnikov, E. Shakhova

V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine

MODEL OF INDUSTRIAL PROCESS IN IMPLEMENTATION OF IT-PROJECT

An analysis of the IT project management was carried out using the Microsoft Project software package. Acquaintance with the essence and tools of project management, which allows to make qualified decisions on coordination of people, equipment, materials, financial resources and schedules for the execution of a certain project at a given time, within the budget and to the customer's satisfaction, taking into account the specifics of the IT field. The optimization of the IT project implementation time by the critical path method is considered. As a result of the calculation, critical, non-critical project operations and reserves or time stocks for non-critical operations are determined. In addition, the method of optimization of the IT project by time and cost is considered. The cross-linking of network graphs and their further ordering by the zonal and matrix method was studied. Prepared recommendations for application of the developed model in the educational process.

Keywords: production management, critical path method, Microsoft Project software package, time and cost optimization method, industrial marketing, zonal and matrix ordering.

Introduction

The project is a complex management system, without which it is not possible today to develop a firm in today's critical economic conditions.

Each project must have a clearly defined goal and objectives of the project. Project implementation is the achievement of the main goal, from the lower level of sub-targets to the highest level, that is, the main goal.

Planning and implementation of projects requires managers of firms with special skills such as methods for analyzing external and internal factors of the firm, market needs, methods for planning and structuring the project, knowledge of project management standards in each of the groups of management processes.

Staging problems

The main reason for most of the failures of software projects is the ineffective organization of IT project management.

The analysis of the work of implementing tens of thousands of projects related to the development of software, several American corporations, conducted in 2017, showed the following:

- 35% of projects completed in time, did not exceed the planned budget and implemented all the necessary functions and opportunities;
- 46% of projects were completed late, costs exceeded the planned budget, and the necessary functions were not implemented in full;
- The average overrun of terms was 120%, the average cost overrun was 100%, and a large number of functions were usually excluded;
- 19% of the projects completely failed and were canceled before completion.

During the analysis of the IT project development process, important parameters such as certain stages of development, sequence of events for achieving the set goal, project timing, duration, cost, different levels of qualification of specialists, management of work at given resources are determined. Therefore, the risks of ineffective planning are significantly reduced [1].

The purpose of the work

The work describes the effectiveness of managing an IT project at a production company.

In order to achieve the goal, the following tasks are solved:

- Establishment and formalization, as well as choice of method for solving the problem of project cost management;
- A model of the problem of optimal planning of project duration and recommendations for its application in the educational process is developed;
- Linking and further streamlining of network graphics by zonal or matrix methods.

Main part

The process of planning the work is considered on an example of software development for the creation of an online store.

To date, the market has a wide range of software tools for project management, but was selected by Microsoft Project, as it combines the intuitive interface of Microsoft Office and all the necessary tools for managing the plan and resources of the project.

The sequence of works can be represented as the next network graph (fig. 1).

Calculation of the network model of the project being developed is the first step in obtaining a calendar plan that determines the beginning and end of each operation. As a result of the calculation, critical, non-critical project operations and reserves or time stocks for non-critical operations are determined. The calculation of the critical path involves two steps.

The first step is called a straight run, the calculations start from the initial event and continue until the final event of the entire network is reached. Calculations are performed according to the formula:

$$ES_j = \max_i (ES_i + D_{ij}), \quad (1)$$

where max is taken for all operations that end in the j event.

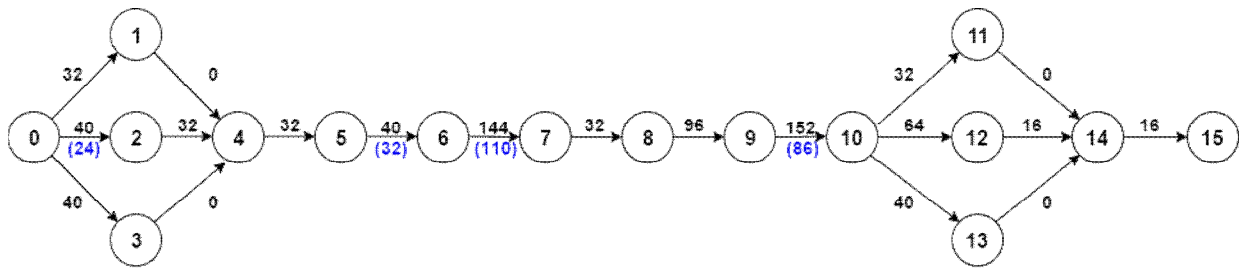


Fig. 1. Network graph for creating an online store

In the second step, which is called back pass, calculations begin with the final network event and continue until the initial event is reached.

Calculations in the back pass are performed according to the formula:

$$LF_i = \min_j (LF_j - D_{ij}), \quad (2)$$

where min is taken for all operations coming out of the i event [2].

The work has optimized the network model in time and cost.

The idea of this method is to choose a compromise ratio between terms and costs and to make a schedule that provides a minimum overall cost for a given project duration.

In fig. 2 shows the dependence of the transaction cost on its duration.

Knowledge of the angle of operations allows managers to compare and select critical operations whose execution time can be reduced. The smaller the angle of the operation, the less the cost of reducing the time period. A steeper incline means that you need more money to reduce one unit of time.

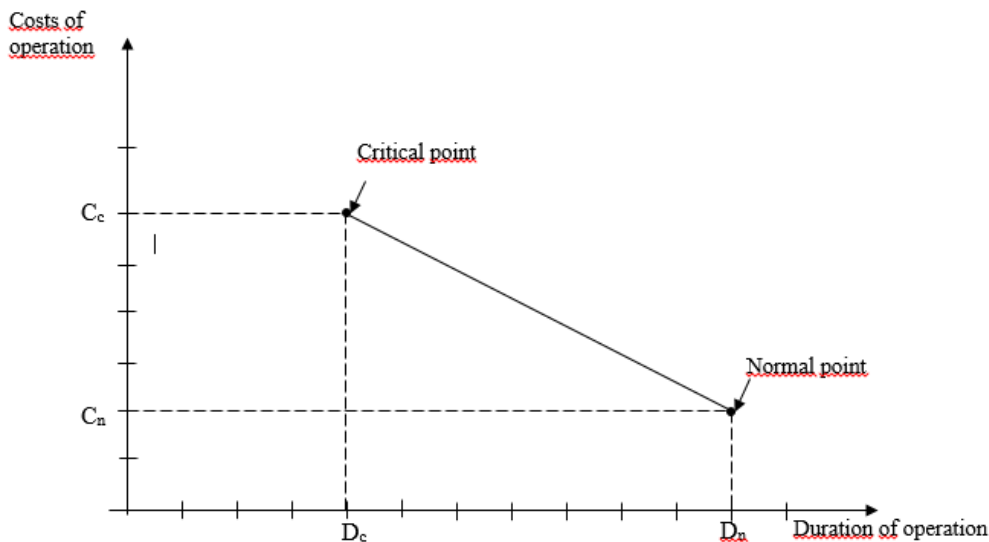


Fig. 2. Scheme of cost dependence on its duration

Moreover, it is calculated by the following formula:

$$a = \frac{C_c - C_n}{D_n - D_c} \quad (3)$$

Total costs are calculated using the formula below:

$$C_{general} = C_{indirect} + C_{direct} \quad (4)$$

Based on the obtained results, a graph of dependence of the total cost of the project on its duration was constructed. It helps to determine that the duration of an operation can be reduced by increasing the use of resources, and thus, increasing the cost of the operation [3].

However, there is a limit - the minimum duration of the operation. At the point that corresponds to this limit (the point of maximally intensive mode), the

further increase in the intensity of resource use leads only to increased costs without shortening the duration of the operation.

In complex projects to build a comprehensive network schedule for one specialist in a short time is not feasible. Therefore, each executor creates a network schedule for a set of operations assigned to him, while in the network of one unit there are events in which other units are needed. Thus, there is a need to combine primary networks.

When aggregating graphs, all instances of inconsistency between individual sections of the network are detected and eliminated through consultations between responsible executors. In this process, initially set the boundary events, common to the component networks. In addition, partial aggregation of works can be carried out. If one or

another work of one part depends on one or another work of the other part, additional terms of association may appear.

When combining graphs into a general one, a private graphic should not disappear or appear. The combination of private network charts is based on a combination of marginal events. For the convenience of combining in each limiting event, all previous work necessary for its accomplishment, and not only those that are part of the original graph, must be indicated. As

a rule, the boundary events in different parts of the graphs denote the same number or an additional graphic symbol.

Here is a simple example. Figure 3 depicts two primary network graphs with two boundary events 0 and 20. Based on a combination of events 0 and 20, we build a third, combined graph. Each event of the combined graph is divided in half: the numerator records the old event number, in the denominator, a new number [4].

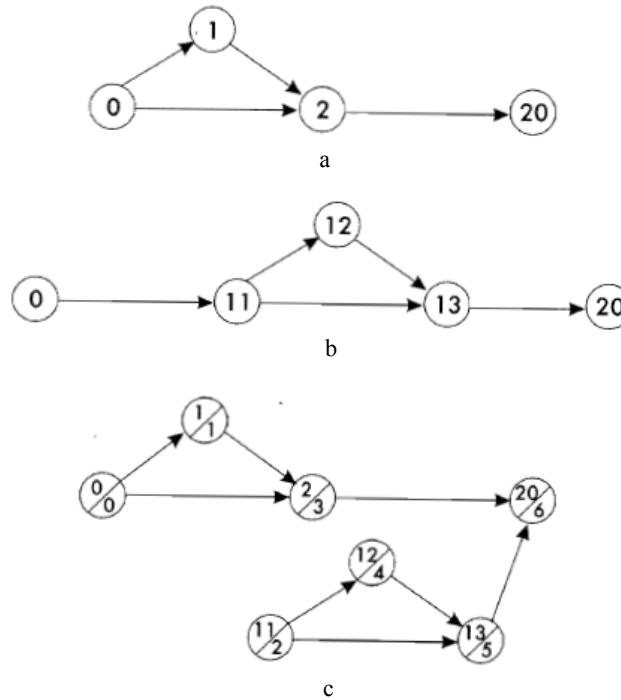


Fig. 3. a, b – primary network graphics; c – network graph received as a result of association

In the procedure of streamlining network graphics, in apparent simplicity, difficulties often arise in its understanding.

As a result, this situation leads to the fact that the initial arrangement of the network graph is not executed, and because of this the result of the planning is not high. Organizing is not only easy and convenient, but also time and labor costs.

The ordering procedure is used in a variety of situations.

When constructing a network graph, as a rule, a sketch network model is first formed, the main purpose of which is to accurately reflect the logic of the relationship between robots. Then, this model is carefully scrutinized for non-compliance with the rules for building networks. After that, the so-called ordering is carried out so that the constructed schedule has a great visibility and simplicity and it was convenient for them to use.

The ordering is to eliminate unnecessary logical connections and events, to change the location of events and works for the visual image, to reduce the number of crossings. It is almost impossible to avoid crossings in network graphics, but you can reduce their number. The smaller the intersections, the more accessible for viewing the network graph [5].

The arrangement procedure can be arranged by the zonal or matrix method [6].

The more complex method is the method of logical zoning in layers. The main mechanism of this method is the conditional breakdown of the entire network graph on the zone - the so-called vertical layers. In each layer, the events are placed in such a way that there is no vertically oriented arrows. In other words, one vertical layer can not get events, between which there is a direct connection, that is, connected by an arrow. The most convenient way of such a breakdown is that the events that are already placed in the layer, mentally struck out of the graph with the works (arrows) that emerge from it. Then the events left without the input arrows will fall into the next layer, and so on until the final event of the network graph. It can move from start to finish (from left to right) by eliminating previous events, and from end to start (from right to left) by excluding the following events.

After placing all the events in the vertical layers, simply change the numbering of the events or move them, if necessary.

Arrangement can also be arranged using a more simple matrix method, which allows topological sorting using the adjacency matrix of vertices, in which, if there is an edge between the vertices, then the corresponding

(intersection of a row and a column) space is a unit, and in the other case it is zero. If the matrix graphs of the network model are represented by vectors V_0, V_1, \dots, V_n then on the basis of operations with them it is possible to consistently exclude events that have no "descendants" (associated with subsequent events) [7].

Conclusions

Thus, we can do the following conclusions:

1. The optimal plan for developing an IT project allowed to identify:

1) certain stages of development, the sequence of events to achieve the goal, the timing of the project, duration, cost, different levels of qualifications of specialists, the composition of work for the given resources;

2) the only correct critical path and noncritical operations for which it is possible to calculate time reserves;

3) choose a coherent correlation between duration and cost, compile an optimal schedule that provides a minimum overall cost for a given project duration.

2. The developed model, with given direct and indirect costs, the cost of intensification of works, can be used in the management of an IT project in the production company and in the learning process in studying the discipline "Project Management".

3. Considered methods for solving the task of streamlining network graphics involves the implementation of several successive steps, resulting in the partition of the graph on the layers and thus organizes the network graph.

REFERENCES

1. Fedyshin, I.B. (2016), *Project Management in Entrepreneurship* (reference note of lectures for students of specialty 7.03060101 "Management of entrepreneurial activity" of all forms of education), TNTU named after Ivan Puluj, Ternopil, 161 p.
2. Babayev, V.M. (2006), *Project Management : A manual for students of the specialty "Project Management"*, Sector of operative polygraphy at the ICC KSAME, Kyiv, 244 p.
3. (2008), *A Guide to a Knowledge Management Project* (PMBOK Manual). Fourth Edition, Project Management Institute, 463 p.
4. Abramova, I.G. (2007), *Project management based on network models : Method. instructions*, Samar. state aerospace Un-t, Samara, 58 p.
5. Nozdrina, L.V., Yashchuk, V.I. and Polotai, O. I. (2010), *Project Management: Textbook*, Center for Educational Literature, Kyiv, 432 p.
6. Kuchuk, G., Kharchenko, V., Kovalenko, A. and Ruchkov E. (2016), "Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems", *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, pp. 1-6. doi:<https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.
7. Once, M.L. (2006), *Project management. Fundamentals of Project Management: Textbook*, KNORUS, Moscow, 768 p.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г. А. Кучук,

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Received (Надійшла) 14.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.04.2018

Модель промислового процесу при впровадженні IT-проекту

А. Г. Бердніков, Є. В. Шахова

Проведений аналіз управління IT-проектom з використанням програмного пакету Microsoft Project. Знайомство з сутністю і інструментами проектного менеджменту, що дозволяє кваліфіковано приймати рішення з координування людей, обладнання, матеріалів, фінансових засобів і графіків для виконання певного проекту в заданий час, в межах бюджету і до задоволення замовника, з огляду на специфіку галузі IT-технологій. Розглянуто оптимізацію часу реалізації IT-проекту методом критичного шляху. У результаті обчислень визначаються критичні, некритичні операції проекту та резерви або запаси часу для некритичних операцій. А також розглянуто метод оптимізації IT-проекту за часом і вартістю. Досліджено зшивання мережевих графіків та подальше їх упорядкування зональним та матричним методом. Підготовлені рекомендації щодо застосування розробленої моделі в навчальному процесі.

Ключові слова: управління виробництвом, метод критичного шляху, програмний пакет Microsoft Project, метод оптимізації проекту за часом і вартістю, промисловий маркетинг, зональний та матричний метод упорядкування.

Модель промышленного процесса при осуществлении IT-проекта

А. Г. Бердников, Е. В. Шахова

Проведен анализ управления ИТ-проекта с использованием программного пакета Microsoft Project. Знакомство с сущностью и инструментами проектного менеджмента, позволяющего квалифицированно принимать решения по координированию людей, оборудования, материалов, финансовых средств и графиков для выполнения определенного проекта в заданное время, в пределах бюджета и к удовлетворению заказчика, учитывая специфику области ИТ-технологий. Рассмотрена оптимизация времени реализации ИТ-проекта методом критического пути. В результате вычислений определяются критические, некритичные операции проекта и резервы или запасы времени для некритических операций. А также рассмотрен метод оптимизации ИТ-проекта по времени и стоимости. Исследовано сшивание сетевых графиков и дальнейшее их упорядочения зональным и матричным методом. Подготовлены рекомендации по применению разработанной модели в учебном процессе.

Ключевые слова: управление производством, метод критического пути, программный пакет Microsoft Project, метод оптимизации проекта по времени и стоимости, промышленный маркетинг, зональный и матричный метод упорядочения.

О. В. Войтко

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ СТРАТЕГІЧНИХ КОМУНІКАЦІЙ МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ ТА ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

Пошук шляхів побудови системи стратегічних комунікацій в Міністерстві оборони та Збройних Силах України, яка б ефективно функціонувала та забезпечувала надійний рівень захисту національних інтересів військового відомства зокрема та держави в цілому, останнім часом став предметом інтенсивних наукових досліджень. Важливою умовою створення системи вітчизняного страткомунікацій є її актуальність викликам сьогодення, що диктуються агресією Російської Федерації проти України. У статті запропоновано один з підходів щодо оцінки ефективності функціонування системи стратегічних комунікацій, який ґрунтується на методі експертного оцінювання. Для підвищення точності та достовірності одержаних результатів запропоновано механізм визначення коефіцієнту фахового рівня експерта, який бере участь в опитуванні. В подальшому, враховуючи розбіжності між одержаними коефіцієнтами, проводиться перерахунок вказаних експертами показників оцінювання системи страткомунікацій. Враховуючи швидкоплинність та інерційність процесів, що відбуваються в системі стратегічних комунікацій, запропонований підхід дозволяє в короткий термін визначити ефективність її функціонування та вжити заходів для оперативного реагування на виявлені загрози.

Ключові слова: стратегічні комунікації; експертне оцінювання; експерт-лідер; фаховий рівень.

Вступ

Вітчизняна стратегія національної безпеки, затверджена Указом Президента України від 26 травня 2015 року № 287/2015, одним з елементів загроз в інформаційній сфері визначає відсутність цілісної державної комунікаційної політики [1]. Це те, що в широкому розумінні і зветься стратегічними комунікаціями, або страткомунікаціями в аббревіатурному вигляді. Через майже три роки з моменту підписання зазначеної Стратегії слово "відсутність" напевно можна змінити на "недостатню ефективність", втім, вагомою перевагою у забезпеченні безпеки від визначеної загрози на державному рівні ця варіація не дає.

Воєнна доктрина України визначає стратегічні комунікації, як скоординоване і належне використання комунікативних можливостей держави – публічної дипломатії, зв'язків із громадськістю, військових зв'язків, інформаційних та психологічних операцій, заходів, спрямованих на просування цілей держави [2]. Очевидно, що у вислові «... усіх комунікативних можливостей держави...» закладене використання кожного доступного елемента інформаційної інфраструктури для втілення ідей та реалізації планів щодо надійного захисту національних інтересів держави як всередині країни, так і на міжнародній арені. А, в умовах тимчасової окупації території Автономної Республіки Крим та проведення операції об'єднання сил в окремих районах Донецької та Луганської областей роль системи стратегічних комунікацій Міністерства оборони та Збройних Сил України набуває визначального статусу.

Постановка проблеми. Виклики, з якими зіткнулася Україна з початком гібридної агресії Російської Федерації, стали визначальними у визнанні пріоритетності розвитку системи стратегічних комунікацій та наближення Збройних Сил нашої країни до стандартів НАТО.

Стратком України сьогодні перебуває в стадії становлення, при чому цей процес, на відміну від

провідних країн світу, відбувається в реальних бойових умовах. Тому наявні проблеми та труднощі потребують оперативного визначення та вирішення.

Досі триває пошук оптимальних підходів в побудові системи стратегічних комунікацій, як на державному рівні, так і у відповідних міністерствах і відомствах – що мають відігравати роль складових національного українського страткомунікацій.

Досвід побудови системи стратегічних комунікацій провідних країн світу безумовно вартий пильної уваги та багато в чому визначатиме основні шляхи розбудови вітчизняного страткомунікацій. Але, очевидно, що важливим тут буде уникнення елементів сліпого копіювання та шаблонності в імплементації цього досвіду при формуванні національної системи стратегічних комунікацій. Особливості сучасних інформаційних викликів та умов, в яких державі необхідно на них реагувати не мають аналогів у жодному досвіді жодної країни світу.

Для синтезу моделі ефективної системи стратегічних комунікацій необхідно об'єктивно оцінити недоліки та переваги функціонування його складових за різних умов її побудови.

Різноманітність, розподіленість, динамічність і багатозв'язність складових елементів системи стратегічних комунікацій зумовлюють об'єктивні труднощі щодо їхньої формалізації і оцінювання. Ці труднощі значною мірою долаються за допомогою методів експертної оцінки, які враховують досвід фахівців з інформаційної безпеки та комунікацій і підвищують адекватність формалізації та оцінювання ефективності функціонування системи страткомунікацій.

Аналіз остатніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження та публікації, за тематикою стратегічних комунікацій в Україні, більшістю своєю присвячені аспектам правового врегулювання (Л.М. Пелепейченко), аналізу досвіду застосування страткомунікацій в провідних країнах світу (А.В. Баровська) та підходам побудови системи стратегічних комунікацій (Т.М. Дзюба). Втім, як об'єктивно оці-

нити ефективність функціонування зазначеної системи, якими методами користуватися для побудови дієвих стратегічних комунікацій? Ці питання переважно залишалися поза увагою.

Метою статті є обґрунтування підходу щодо оцінювання ефективності функціонування системи стратегічних комунікацій Міністерства оборони та Збройних Сил України.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для оцінки ефективності функціонування системи стратегічних комунікацій Міністерства оборони та Збройних Сил України пропонується використовувати метод експертного оцінювання.

З метою досягнення необхідного рівня достовірності одержаних результатів, для проведення оцінювання необхідно залучати експертів, які мають значний досвід у галузі інформаційної безпеки в усіх сферах її забезпечення. З метою об'єктивізації та узагальнення даних експертів здійснюється максимальне урахування рівня професійності при узагальненні даних, отриманих від експертів. Для визначення професійного рівня експертів визначаються показники оцінки їх фахового рівня L^f .

Показники визначення професійного рівня експертів відображаються в таблиці за наступними показниками: 1) прізвище, ім'я та по батькові експерта; 2) займана посада; 3) загальний досвід роботи в галузі; 4) практичний досвід роботи в галузі; 5) участь в науково-дослідній роботі; 6) участь в командно-штабних навчаннях; 7) участь у наукових працях; 8) досвід у розробці нормативних документів тощо.

З метою спрощення процедури урахування досвіду експертів показники оцінюються за бінарною шкалою: 1 – наявність відповідних умов, зазначених в заголовку таблиці; 0 – відсутність відповідних умов, зазначених в заголовку таблиці. Значення інтегрального показника виводиться як сума значень всіх показників. З метою виділення одного лідера серед фахівців, які мають найвищий фаховий рівень, перевагу надається тому, хто має практичний досвід роботи (досвід участі в бойових діях, антитерористичній операції). Різниця між фаховим рівнем експерта-лідера і експерта визначається за формулою:

$$\Delta L^f = L_l^f - L_e^f,$$

де $L_l^f \in [0;1]$ – фаховий рівень експерта (експерта-лідера), який відображає ступінь відповідності визначення значень показників реальному стану справ.

Експертна оцінка, ваги інформаційних заходів проводиться наступним чином. Здійснюється перерахування значень показників, визначених експертами з урахуванням їх фахового рівня.

Величина розбіжності між значеннями певного показника, визначеними експертом-лідером і експертом, визначається за формулою

$$\Delta g^f = g_l^f - g_e^f,$$

де g_l^f – значення певного показника, визначене експертом (експертом-лідером).

Перераховане значення показника, визначене експертом, з урахуванням поправки на його фаховий рівень, визначається за формулою:

$$g_e^{f*} = g_e^f + \Delta L^f \times \Delta g^f.$$

Фізичний сенс другої складової в цій формулі полягає у тому, що вона визначає ту частку похибки, яка вноситься експертом за рахунок різниці у фаховому рівні між експертом-лідером і ним. Знак цієї складової визначається різницею, адже різниця завжди має знак +, оскільки значення фахового рівня експерта-лідера не може бути меншим порівняно зі значеннями фахового рівня інших експертів.

Отже, перераховане значення певного показника g_e^{f*} , визначене експертом, буде завжди ближчим за початкове його значення g_e^f до значення цього ж показника, визначеного експертом-лідером g_l^f .

В подальшому, результати оцінювання ефективності складових системи стратегічних комунікацій та перераховані за допомогою наведених вище математичних залежностей дані узагальнюються у відповідну таблицю показників, за кожний елемент оцінювання окремо. У підсумку визначається загальна оцінка за кожний елемент системи страткому та загальний результат ефективності моделі, що запропонована. Для порівняння одержаних результатів та подальших висновків щодо ефективності створення тієї чи іншої структури системи стратегічних комунікацій експертам пропонується інший варіант побудови моделі страткому (наприклад з відокремленим органом управління, більш розгалуженою структурою чи, навпаки, скороченою). Експерти знову оцінюють ефективність функціонування кожного з запропонованих варіантів побудови системи стратегічних комунікацій та, за результатами математичних перерахунків одержуються дані щодо підсумків оцінювання.

Шляхом порівняння отриманих оцінок ефективності функціонування запропонованих моделей побудови систем стратегічних комунікацій обирається варіант з найвищим підсумковим результатом.

Запропонована методика формування системи стратегічних комунікацій Міністерства оборони та Збройних Сил України на базі методу експертних оцінок дає змогу оцінити ефективність функціонування запропонованих моделей системи, визначити необхідну кількість її складових та дозволяє раціонально побудувати цю систему для забезпечення інформаційної безпеки силового відомства і держави в цілому.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Як показує світовий досвід, ефективна протидія інформаційному-психологічному впливу та створення сприятливих умов для власних інформаційних дій має спиратися на дієву систему стратегічних комунікацій. Недосконалість існуючого науково-методичного апарату щодо організації системи страткому не дає змоги побудувати дієву її структуру. На сьогоднішній день,

практично єдиним інструментом для оцінювання ефективності функціонування системи стратегічних комунікацій є експертні методи, що базуються на досвіді фахівців в сфері інформаційної безпеки та комунікацій. Враховуючи швидкість зміни обстановки в системі стратегічних комунікацій, запропонований

підхід дозволяє оперативно визначати ефективність функціонування страткому та вчасно реагувати на актуальні загрози. Для підвищення точності та достовірності одержаних результатів зазначена тема потребує поглибленого вивчення та вдосконалення, що обґрунтовує **подальші дослідження** в цій сфері.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стратегія національної безпеки України, затверджено Указом Президента України 26 травня 2015 року № 287/2015 [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.zakon5.rada.gov.ua/laws/show/287/2015>.
2. Воєнна доктрина України, затверджена Указом Президента України від 24 вересня 2015 року – № 555/2015 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.president.gov.ua/documents/5552015-19443>.
3. Основи стратегії національної безпеки та оборони держави / Дузь-Крятченко О.П. та інші. – К.: НУОУ, 2010. – 486 с.
4. Ліпкан В.А. Сутність гібридної війни проти України / В.А.Ліпкан // Імперативи розвитку цивілізації. – 2015. – №2.
5. Наказ Генерального штабу Збройних Сил України від 07.10.2016 року № 374.
6. US Department of Defense: Report on Strategic Communication [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/dod/dod_report_strategic_communication_11feb10.pdf.

REFERENCES

1. Strategy of the national security of Ukraine, approved by the Decree of the President of Ukraine on the 26th of April 2015 No. 287/2015, available at: <http://www.zakon5.rada.gov.ua/laws/show/287/2015>.
2. Military doctrine of Ukraine, approved by the Decree of the President of on the 24th of September 2015 № 555/2015, available at: <http://www.president.gov.ua/documents/5552015-19443>.
3. Duz-Kriatchenko, O, Dziuba, T and Ros A. (2010), The basis of the strategy of national security and defense of the state: textbook, NDUU, Kyiv, 486 p.
4. Lipkan, V. (2015), “The essence of the hybrid war against Ukraine”, The imperatives of the development of civilizations, No. 2.
5. The order of the General Staff of Ukraine, signed on the 7th of October 2016 №374.
6. US Department of Defense: Report on Strategic Communication, available at: http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/dod/dod_report_strategic_communication_11feb10.pdf.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М. А. Павленко,
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків
Received (Надійшла) 12.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.05.2018

**Оценка эффективности функционирования системы стратегических коммуникаций
Министерства обороны и Вооруженных Сил Украины**

А. В. Войтко

Поиск путей построения системы стратегических коммуникаций в Министерстве обороны и Вооруженных Силах Украины, которая бы эффективно функционировала и обеспечивала надежный уровень защиты национальных интересов военного ведомства в частности и государства в целом, в последнее время стал предметом интенсивных научных исследований. Важным условием создания системы отечественного страткома есть ее актуальность сегодняшним вызовам, которые продиктованы агрессией Российской Федерации против Украины. В статье предложен один из подходов по оценке эффективности функционирования системы стратегических коммуникаций, который базируется на методе экспертного оценивания. Для повышения точности и достоверности полученных результатов предложено механизм определения коэффициента профессионального уровня эксперта, который принимает участие в опросе. В дальнейшем, учитывая различия между полученными коэффициентами, проводится пересчет указанных экспертами показателей оценивания системы страткома. Учитывая скоротечность и интенсивность процессов, которые происходят в системе стратегических коммуникаций, предложенный подход дает возможность в короткое время определить эффективность ее функционирования и принять меры для оперативного реагирования на выявленные угрозы.

Ключевые слова: стратегические коммуникации; экспертное оценивание; эксперт-лидер; профессиональный уровень.

**The evaluation of effectiveness of the system of strategic communications
functioning of the Ministry of defense and the Armed Forces of Ukraine**

O. Voitko

Finding ways of the system of strategic communications creation in the Ministry of Defence and the Armed Forces of Ukraine, which would function effectively and provide a reliable level of the national interests protection particularly of the military institution and of the country entirely, recently has become an object of intensive scientific researches. An important requisition of the national Strarcom system's creation is as follows: it must actually respond to nowadays challenges, posted by Russian Federation's aggression against Ukraine. In the article one of the approaches was proposed to evaluate the effectiveness of the system of strategic communications functioning, which is based on the method of expert's evaluation. For increasing of precision and reliability of getting results the mechanism of determination of the expert's professional level coefficient was proposed. Further, taking in account the difference between gotten coefficients the recalculation of marked expert's results must be hold. Because of transience and intensiveness of the processes, which take place in the system of strategic communications, proposed method provides an opportunity to deter the effectiveness of its functioning in a short term and operatively respond on detected threats.

Keywords: strategic communications, expert's evaluation, expert-leader, professional level.

G. Golovko, M. Koltunov, A. Samofal

Poltava national technical Yuri Kondratyuk university, Poltava, Ukraine

PROBLEMS OF COMPREHENSIVE PROTECTION OF INFORMATION AT PJSC "RESEARCH AND DESIGN-PROCESSING INSTITUTE OF THE ENAMELED CHEMICAL EQUIPMENT AND NEW TECHNOLOGIES KOLAN"

The subject of research describes the peculiarities of the use of information security systems in the activities of PJSC "Research and Design-Processing Institute of the Enameled Chemical Equipment and New Technologies KOLAN". The essence of information security systems and the tasks that they can perform are defined. The **aim** is to take notice of comprehensive protection problems in enterprises. The following **results** are obtained. Information security performs four important for an organization which is protect the organization's ability to function, enable the safe operation of applications implemented on the organization's IT systems, protect the data the organization collect and uses, and lastly is safeguards the technology assets in use at the organization. **Conclusions.** The main components that form internal and external information security are defined. It is proved that the use of information security systems is an obligatory condition for the activity of a modern enterprise or production, which will help prevent the loss or theft of important sensitive information. Information security is crucial in organization. All information stored in the organization should be kept secure. Information security will be defined as the protection of data from any threats of virus. The information security in important in the organization because it can protect the confidential information, enables the organization function, also enables the safe operation of application implemented on the organization's Information Technology system, and information is an important asset for an organization

Keywords: protection, protection of information, information security, security of information.

Introduction

In the modern world, enterprise informational support and the introduction of new technologies are increasing. Now almost every enterprise, ranging from small firms to large corporations, has its own information systems. The main task of working with the information at the enterprise is the protection of its integrity, restriction of access to confidential information of third parties, the distinction of access to information of certain groups of employees, the establishment of a proper security system, as well as the encryption of confidential data of the enterprise. Implementation of information security systems at enterprises is a must for saving money, time and limiting access to confidential information. Recording of accounting documents, materials in stock, and raw materials, allows management to operate more effectively. At the enterprise there are systems that allow running the accounting information system and information systems for interaction with buyers. Lost or theft of information of such importance can cause losses or paralyze the workflow.

The purpose of researches. Analysis of the features of the use of modern comprehensive information security measures in the enterprise to prevent the loss or theft of strategic data at production. Study of the importance to introduce technologies and methods of their protection at the enterprise.

Analysis of recent research and publications. The analysis of scientific publications gives grounds to assert that in the process of designing, creating and operating information security systems there are errors and inaccuracies that significantly reduce the effectiveness of their operation. Development of information security policy that defines the strategy and tactics of the information security system in enterprise information systems and takes into account the dynamics of processes for changing the types and level of information threats, which is one of the active and significant resources of modern business environments, needs a separate justification for

[1]. The system of information security in information systems of enterprises should be based on the principles of complexity and adaptability. It is advisable to develop an organizational structure and implement a system of information security in the information systems of enterprises in accordance with the recommendations of international standards and current legislation of Ukraine. Such standards are: ISO / IEC 27002 "Information Technology. Methods of protection. Code of Practice for Information Security Management"; ISO / IEC 27003 "Information Technologies. Methods of Protection: Guidelines for the Application of Information Security Management System"; ISO / IEC 27004 "Information Technology. Methods of protection. Measurement"; ISO / IEC 27005 "Information Technologies. Security Methods: Information Security Risk Management"; ISO / IEC 27006 "Information Technology. Security Methods. Requirements for the audit and certification of information security management systems"; ISO / IEC 27011 "Information Technology. Guidelines for Information Security Management for Telecommunications "[2]. Compliance with the ISO 27000 series standards ensures the management and control of the access, development and maintenance of hardware and software systems, and the management of the continuity of business processes. Compliance with ISO 27000 and compliance with national information security laws are essential for sustainable business development.

Presentation of the main result of research

Information security is the protection of information from the negative influences thereon. It relates to the technological protection procedures.

According to the requirements of the Laws of Ukraine "On Information", "On State Secrets" and "On the Protection of Information in Automated Systems", the main object of protection in information systems is information with restricted access, which is state or other, provided by the legislation of Ukraine, confidential information that is a state property or transferred to the state

in possession, use, disposal. In general, the object of protection in the information system is limited access information circulating and stored in the form of data, commands, messages that have a certain limitations and value for both its owner and potential intruder of technical protection of information. Intruder is a user who carries out unauthorized access to information [3]. By means of implementation, all information security measures are subdivided into legal (legislative), moral and ethical, organizational (administrative), physical and technical (software and hardware) ones. In our country there are changes at all levels of leadership and management, which are due to the intensive introduction of the latest information technology. The rapid improvement of information support, its penetration into all spheres of vital interests has, in addition to undeniable advantages, the appearance of a number of strategic problems. The risk of unauthorized interference into computer, information and telecommunication systems is increasing.

The urgency of the problem of protecting information and the safe use of information systems from various threats can be found out from the data published by Computer Security Institute in San Francisco, California, USA, according to which intrusions and interference into the work of information systems occurs for the following reasons: hacker attacks (unauthorized access) - 2%; viruses - 3%; hardware failure - 20%; targeted actions of workers - 20%; error in the work of employees - 55%. Thus, the human factor is the greatest threat, since the actions of workers make up 75% of intrusions and interference into the work of information systems.

The main task in reaching the information security protection of the information system is the limited access information that functions and is stored in the form of various data, commands, and messages. These data may be valuable not only to the owner but also to the potential intruder of technical protection of information.

Taking into account the economic situation of some companies, previous versions of the software are used to save money. Given that, for example, some versions of operating systems cease to be served after some time, they are successfully exploited by malicious people. Starting from May 12, 2017, a large number of computers with Windows operating system were under the virus attack by the WannaCry virus. The virus encrypted users' files so they could not be used; for decoding, the attackers demanded money. There were infected about 300,000 computers in at least 150 countries around the world. Losses were valued at more than \$ 1 billion. A large number of state-owned companies in different countries suffered from the attack and more than 70% of the affected companies were in Russia and Ukraine. After the attack, Microsoft released security patches for operating systems that were no longer supported by the company, namely Windows XP, Windows Server 2003, and Windows 8 [4]. Therefore, experts advise using computers with important information without access to the Internet or protect them properly.

A high percentage of penetration of intruders occurs due to low-skilled workers who serve the information systems incorrectly. Most DDOS attacks occur due to the low qualification of system administrators who do not use network configuration in relation to incoming data packages. This is how the attacks are masked. In the absence of authorized user, control and delimitation

of access to the terminal, the skilled intruder easily uses its functionality for unauthorized access to the information to be protected by entering appropriate requests or commands. In the presence of free access to the premises, one can visually observe information on means of storage and documentation, steal a paper carrier, make a copy, and steal other media with information: lists, magnetic media, etc.

A particular threat is the uncontrolled download of software that can change the settings, properties, data, algorithms, the introduction of a "trojan" program or rooted computer virus that perform destructive unauthorized actions. For example, the recording of information on a foreign media, illegal transmission of communication channels, unauthorized printing of documents, violation of their integrity, unauthorized copying of important information, the value of which is determined and limited for a very short or, conversely, long time.

Threatening is the situation where an intruder is an authorized user of an information system who, in connection with his functional duties, has access to one part of the information, and uses another part beyond his authority. There are many ways the authorized user can disrupt the operation of the information system and obtain, modify, distribute or destroy the information to be protected. To do this, you can firstly use privileged IO commands, uncontrolled authorization or legitimacy of the request, and access to databases and data banks, servers, etc. Free access gives the intruder the opportunity to access other people's files and databases, and change them accidentally or intentionally.

During maintenance of the equipment, the remains of information on its carriers (hard disk surfaces, magnetic tapes and other carriers) can be found out. Erasing information by conventional methods (by means of operating systems, special software utilities) is ineffective in terms of technical protection of information. The intruder can recover and read its remains, which is why one needs only special means of erasing the information to be protected. During transportation of carriers in the non-protected territory, there is a threat of interception of information to be protected and its further reading by other parties. An intruder may become an authorized user of the information system in time-sharing mode, if he has previously determined the order of operation of the authorized user or if he works with him on the same lines of communication. The intruder can connect to the communication link between the terminal and the computer processor. In addition, without interruption of work of authorized user, the intruder can continue the operation on their behalf by canceling the signals of the disabling of the authorized user.

The processing, transmission and storage of information by hardware means of the information system is provided by triggering logic elements based on semiconductor devices. The elaboration of logic elements is caused by high-frequency displacement of levels of voltages and currents, which leads to the emergence of environment, power and ground links, as well as in parallel-placed links and inductances of foreign equipment of electromagnetic fields that carry the characteristics of the information being processed in the amplitude, phase and frequency of their oscillations the characteristics of process information. Use by intruder of different receivers can lead to unauthorized leakage and interception of very important information stored in the infor-

mation system. With the decrease in the distance between the receiver of the intruder and the hardware of the information system, the probability of receiving such information signals increases.

Conclusion

The complex task faced by modern users of information systems at manufacturing enterprises is to increase the efficiency of its work, namely, a comprehensive action on the production process, interaction with information, network infrastructure, organizational structure, management and payment systems, and the corporate culture of production.

After the analysis of PJSC "Research and Design-Processing Institute of the Enamelled Chemical Equipment and New Technologies KOLAN", were given recommendations for the implementation of the following comprehensive security measures for the use of information: physical means; hardware; software tools; hardware and software means; cryptographic and organizational methods.

Physical means of protection are the means necessary for external protection of computer facilities, terri-

tories and objects. They are implemented on a computer basis, which are specifically designed to create physical barriers to possible ways of intrusion and unauthorized access to components of protected information systems.

Hardware protection means are a variety of electronic, electronic and mechanical and other devices that are mounted in serial units of electronic processing and data transmission systems for the internal protection of computer equipment: terminals, input and output devices, processors, communication lines, etc. Software tools, built in the software system, are required to perform logical and intelligent security features. Hardware and software means of protection are tools based on the synthesis of software and hardware means.

Organizational measures for the protection of information constitute a set of measures for the selection, verification and training of personnel involved in all stages of the information process.

Therefore, the main aspect in development and practical and safe application of the information system in the workplace, is the introduction of all methods of protection in the field of its information support, which helps the data integrity optimization and savings.

REFERENCES

1. Sievierinov, O.V., Chernysh, V.I. and Molchanova, M.Y. (2011), "Information security management in accordance with international standards", *Control, navigation and communication systems*, CSRI N&M, Kyiv, pp. 250-253.
2. International standard ISO/IEC 27002, available at: www.iso27000security.com.
3. The Law of Ukraine. The protection of information in information and telecommunication system, available at: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/>.
4. The greatest and biggest attacks of computers viruses ever, available at: <http://tass.ru/info/4248876>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. Л. Ляхов,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

Проблеми комплексного захисту інформації на підприємстві ПАТ «НДІ Колан»

Г. В. Головка, М. Г. Колтунов, А. С. Самофал

Мета дослідження – описати особливості використання систем захисту інформації у діяльності підприємства ПАТ «НДІ КОЛАН». Виявлено сутність систем захисту інформації та задачі, які вони можуть виконувати. **Мета** роботи полягає в тому щоб висвітлити проблему комплексного захисту інформації на підприємствах. Отримано наступні **результати**. Захист інформації виконує чотири важливих функції для організації, захист здатності функціонування організації, забезпечує безпечну роботу програмних додатків, що впроваджені у ІТ системи на підприємстві, захищати дані які збирає та використовує організація, і нарешті, гарантує безпечне зберігання технологічних активів, що використовуються на підприємстві. **Висновки**. Визначено основні складові частини, які утворюють внутрішню та зовнішню безпеку інформацію. Доведено, що використання систем захисту інформації є обов'язковою умовою у діяльності сучасного підприємства або виробництва, що сприятиме запобіганню втрати або викрадення важливої конфіденційної інформації. Доведено, що інформаційна безпека захищає дані від загроз або вірусів. Інформаційна безпека важлива на підприємствах, оскільки може захистити конфіденційну інформацію, забезпечити функціонування організації, а також забезпечує безпечну роботу програмних додатків, які використовують ІТ системи підприємства, та інформація важливим активом для організації.

Ключові слова: захист, захист інформації, інформаційна безпека, безпека інформації.

Проблемы комплексной защиты информации на предприятии ПАО «НИИ Колан»

Г. В. Головка, Н. Г. Колтунов, А. С. Самофал

Цель исследования – описать особенности использования систем защиты информации в деятельности предприятия ПАО «НИИ КОЛАН». Определена сущность систем защиты информации и задачи, которые они могут выполнять. **Цель** работы заключается в том, чтобы осветить проблему комплексной защиты информации на предприятиях. Получены следующие **результаты**. Защита информации выполняет четыре важных функции для организации, защита способности функционирования организации, обеспечивает безопасную работу программных приложений, внедрённых в ИТ системы на предприятии, защищать данные, которые собирает и использует организация, и наконец, гарантирует безопасное хранение технологических активов, используемых на предприятии. **Выводы**. Вывявлено составные части, которые создают внутреннюю и внешнюю безопасность информации. Доказано, что использование систем защиты информации является обязательным условием в деятельности современного предприятия или производства, что будет способствовать предотвращению утери или кражи важной конфиденциальной информации. Доказано, что информационная безопасность защищает данные от угроз или вирусов. Информационная безопасность важна на предприятиях, поскольку может защитить конфиденциальную информацию, обеспечить функционирование организации, а также обеспечивает безопасную работу программных приложений, которые используют ИТ системы предприятия, и информация важным активом для организации.

Ключевые слова: защита, защита информации, информационная безопасность, безопасность информации.

G. Golovko, K. Nikiforova

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

INFORMATION SYSTEMS USE AT POLTAVA NATIONAL TECHNICAL YURI KONDRATYUK UNIVERSITY

Aim of the article is to consider the peculiarities of the use of modern information systems in the activities of higher education institutions. The essence of information systems and the tasks they can perform are revealed. The basic components of the parts that form the internal information base are determined. The directions of the introduction of information and communication technologies in the management and educational activity of an educational institution are considered. The dependence of the information system effectiveness on the correct strategy for the development, acquisition and use of software products is determined. The article describes the ways of developing and developing information management systems in a higher educational institution. It is proved that the information systems use is a prerequisite for the activity of a modern higher education institution, which will promote the adoption of sound strategic management decisions aimed at increasing competitiveness and creating an adequate and efficient infrastructure.

Keywords: systems, information systems, information technologies, automation, management.

Introduction

Various types of resources are needed for the development of human society: instrumental, material, energy, as well as information. At present, there is a significant increase in the volume of information flows and this applies to almost all spheres of human activity.

The environment in which a person lives, studies and works has a significant influence on the formation of the individual. Therefore, the urgent problem for all higher educational institutions is it is necessary to introduce modern innovative technologies to create a modern informational educational and scientific environment. The university has information systems in which the student can at any time receive all necessary information for training, tutorial instruction and communication with colleagues. The university information systems correspond to the modern needs of the information society, the current state of science and technology development, educational standards and promote the formation of information and communication competencies of all participants in the educational process from the professor to the student [2].

The research purpose. Analysis of the peculiarities of the modern information systems use in the activity of the higher educational institution in order to create an effective infrastructure and its compliance with the strategic objectives of the higher educational institution. Identify the essence of information systems and the tasks they can perform. To study the main components that form the internal information base. Investigation of the importance of implementing information and communication technologies in the management. Determine the dependence of the effectiveness of the information system on the correct strategy for the development, acquisition and use of software products.

Literature review/ In scientific literature there are many definitions of the "information system" notion. However, as the research shows, there is no single established and generally accepted definition. Depending on the need, in different cases, different thoughts are applied. Thus, in the economic encyclopedia E. Panchenko notes that the basis of information systems are information models that describe and regulate information flows in

management with the help of certain algorithms and procedures for the recording and processing information. According to V. Ponomarenko, the purpose of the information system is the production of information for the use by the management apparatus. Accordingly, it provides for the accumulation, editing, preservation, processing, generalization and specification of information.

I. Vovchak argues, if the definition of the term "information system" is to be based on a resource approach, the information system can be interpreted as a combination of means and methods of production, accumulation, transformation and use of information resources of the enterprise in order to realize the basic functions of management by users. The Czech researcher K. Kachir considers the difference in the data processing system from information systems, emphasizing the destination and purpose of their design. At the same time, he notes that the data processing system is designed to perform this function over the data that arose at the enterprise and are recorded in certain information media. In other words, this system is not conditioned by the ultimate goal of management - making the necessary management decisions [1].

Research results

Information system is a set of organizational and technical means for storing and processing information in order to provide information needs of users.

Information systems exist from the moment of the society appearance, because at each stage of its development there is a need for management. The mission of the information system is the processing of information necessary for the effective management of all organization resources, the creation of information and technical environment for managing its activities. An information system can exist without the use of computer technology, it is a matter of economic feasibility.

In any information management system, the three types of tasks are solved: problems of situation assessment (sometimes referred to as problems of pattern recognition); tasks of transforming the description of the situation (calculation tasks, modeling tasks); tasks of decision-making (including optimization).

Information systems include: technical means of data processing, software and relevant personnel. Four components form an internal information base: means of fixing and collecting information; means of transferring relevant data and reports; means of information preservation; means of information analysis, processing and presentation. For a modern higher education institution (HEI) information is one of the most important components of management processes, because its production, transmission and consumption is a "foundation" for the effective functioning of all spheres of society's life. The result of any modern social institution activity, first of all - the education system, largely depends on the formation correctness and use of information flows [5].

Information system of a higher educational institution is a set of interconnected components that collect, process, store, distribute and analyze information that provides decision-making, coordination, monitoring and implementation of the organization's activities. Information refers to data that are presented in a particular form and have meaning and benefit for those who use it.

The effectiveness of the information system depends on the correct strategy of the development, acquisition and use of software products. Qualitative higher education should be focused on innovative technologies and products offered by companies - world leaders in the field of information technology. The use of home-made software products that require the constant technical support of developers and become morally obsolete even before their normal work can be get its act together.

A new qualitative stage in the development of education is possible only with the intensive introduction of information and communication technologies in the management and educational activities of a comprehensive educational institution. Such activity is conducted in two directions:

- implementation of information technologies in the management of educational activities;
- computerization of the institution educational process and educational work.

The first of these directions is in creating optimal conditions for automating work places of the participants in the educational process and their use of software, which will help to systematize the management work of educational institutions at all levels of the management system. The second direction is the testing and introduction into the educational process of electronic learning materials, the development and application of electronic support of training sessions, self-sustaining and educational work and test software tools.

The use of an integrated information system and modern information technologies in the educational process and in the management system as a whole can be considered from different points of view. On the one hand, it is the basis of the university's innovative management system, on the other hand, it is a means of creating conditions for the development of student's creative abilities, increasing the teacher's competence, individualizing the learning process, and ensuring the learning process quality. Innovation in the educational institution management based on information technology is a key mechanism that will create an advantage in

a competitive environment. In this direction, the main measures in the development of informatization is the creation of its proper and efficient infrastructure, the introduction of unified means of access to corporate data, the management improvement of all complexes of information resources, and also ensuring the compliance of the infrastructure with the higher educational institution strategic objectives [4]. In the structure of information systems of higher educational institutions one can identify a number of subsystems - both autonomous and integrated into the general automated control system of universities. There are the following subsystems:

- subsystems such as "electronic dean's office";
- the subsystem of the educational process supervisory control, including the functions of developing the schedules of training sessions;
- subsystem of methodological support management and a base of educational materials, which is intended to accompany educational and methodical documentation and electronic educational materials;
- subsystem of the research sector management;
- subsystem of paperwork, supporting the work of the office, archives, expeditions, etc.;
- subsystem "Cadre";
- accounting and planning-economic subsystems;
- library information system, which serves for accounting of library funds, search for users of literary sources, registration and satisfaction of quotes;
- remote control subsystem included in the educational portals software;
- subsystem of university engineering services support.

Typically, there are two ways of developing information management systems at universities: the creation of a single corporate automated control system or the creation and integration of independent programs that automate the activities of individual units or some management functions [3].

In the process of developing the informatization project for educational process management at the university it is necessary to take into account such features:

- a large number of workplaces, where computer equipment is periodically changed and operating systems are updated;
- considerable distance of users of the system located in different parts of the city;
- information is created in the system by a small number of "active" operators;
- information is used by a wide range of consumers (management staff, dean's and department staff, teachers and students, their parents) with different access rights;
- the need for a permanent adaptation of the information system to the educational process needs, which change as a result of the higher education system transformation.

There is a task to create an informational system topic for the Department of Chemistry of the Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. This information system should contain information about the history of the department and its staff composition. Also it has to provide information to students and entrants

about the teaching and research work of the department, methodological support and participation in conferences.

Conclusions

One of the challenges faced by a modern university is to increase its efficiency, namely, a comprehensive action on the strategy, network infrastructure, organizational structure, management and payment systems, and the corporate culture of a higher educational institution. The construction, support and development of a unified integrated information management system of the university is an extremely complex and time-consuming process that should be consistent with the concept of the activity and strategy of the educational institution development.

The only solution to this problem is to automate the university activities and create an informational environment, which, on the one hand, provides access to the necessary, consistent and complete information when is essential for users, on the other hand, is an

essential tool for the university staff activities and the training of students. Such an information environment allows you to manage processes, data and people, that is, the information environment can be considered from the point of view of maintaining of the university life and as a management tool. At the moment, most of the universities use "partial" automation, that is, they computerize only certain business processes. It leads to duplication and loss of information, lack of data for operational analysis, loss of time for maintenance and maintenance of obsolete technologies, high degree of dependence on the human factor.

Thus, the experience of designing and practical application of the automated control system at a higher educational institution has shown that the innovative technologies implementation in the field of its informatization contributes to the optimization of the educational process and is an effective tool for providing high-quality training of specialists.

REFERENCES

1. Beynon-Davis, Paul (1989), *Information Systems Development*, Macmillan Education Ltd., London, pp. 38-54.
2. Tozer, Edwin E. (1988), *Planning for Effective Business Information Systems*, Pergamon Press, Oxford, 265 p.
3. Project Management for Information Systems in Higher Education (2001), HERUG Int. Conf., Newcastle, 10-12 April 2001/
4. Lindsay, J. (2006). *Information systems – Fundamentals and issues*, Kingston University, UK
5. Lovrekovic, Z., Ruzic-Dimitrijevic, L. & Nikolic, B. (2007), "Information system implementation based on process approach at higher education institutions", *Proc. of the Computer Science and IT Education Conference*, CSITEd 2007, Mauritius.
6. Davenport, T.H. & Prusak, L. (1997), *Working knowledge: How organizations manage what they know*, Harvard Business School Press.
7. Mihajlovic, D. (1998), *Information system and data base project*, University in Novi Sad.
8. Pfleger, S.L., & Atlee, J.M. (2006), *Software engineering theory and practice*, Pearson Education.
9. Prince, T.R. (1971), *Information systems for management planning and control*, Georgetown, Ontario, Irwin – Dorsey Limited,

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. Л. Ляхов,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

Використання інформаційних систем

у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка

Г. В. Головка, К. М. Нікіфорова

В статті описано особливості використання сучасних інформаційних систем у діяльності вищих навчальних закладів. Виявлено сутність інформаційних систем та задачі, які вони можуть виконувати. Визначено основні складові частини, які утворюють внутрішню інформаційну основу. Розглянуто напрямки запровадження інформаційно-комунікаційних технологій в управлінську та навчально-виховну діяльність навчального закладу. Визначено залежність ефективності інформаційної системи від правильної стратегії розроблення, придбання і використання програмних продуктів. У статті описано способи розробки та розвитку інформаційних систем управління у вищому навчальному закладі. Доведено, що використання інформаційних систем є обов'язковою умовою діяльності сучасного вищого навчального закладу, що сприятиме прийняттю обґрунтованих стратегічних управлінських рішень, спрямованих на зростання конкурентоспроможності та створення належної та ефективної інфраструктури.

Ключові слова: системи, інформаційні системи, інформаційні технології, автоматизація, управління.

Использование информационных систем

в Полтавском национальном техническом университете имени Юрия Кондратюка

Г. В. Головка, К. Н. Никифорова

В статье описаны особенности использования современных информационных систем в деятельности высших учебных заведений. Выявлена сущность информационных систем и задачи, которые они могут выполнять. Определены основные составные части, которые образуют внутреннюю информационную основу. Рассмотрены направления внедрения информационно-коммуникационных технологий в управленческую и учебно-воспитательную деятельность учебного заведения. В статье описаны способы разработки и развития информационных систем управления в высшем учебном заведении. Определена зависимость эффективности информационной системы от правильной стратегии разработки, приобретения и использования программных продуктов. Доказано, что использование информационных систем является обязательным условием деятельности современного высшего учебного заведения, будет способствовать принятию обоснованных управленческих решений, направленных на рост конкурентоспособности и создания надлежащей и эффективной инфраструктуры.

Ключевые слова: системы, информационные системы, информационные технологии, автоматизация, управление.

Д.Є. Гришманов

Льотна академія Національного авіаційного університету, Кропивницький, Україна

МЕТОД ВИБОРУ РАЦІОНАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ ДІЙ АВІАЦІЙНОГО ДИСПЕТЧЕРА

Предметом вивчення в статті є процеси діяльності авіаційних диспетчерів чергової зміни районного диспетчерського центру (РДЦ) системи обслуговування повітряного руху. **Метою** є розробка методу вибору раціональних алгоритмів дій авіаційного диспетчера при обслуговуванні повітряного руху. **Завдання:** обґрунтувати можливість застосування мережевих моделей для вибору алгоритму дій авіаційного диспетчера. Застосованими **методами** є: метод структурно-алгоритмічного аналізу та метод мережевих моделей діяльності. Отримані такі **результати**. Запропоновані шляхи розширення можливостей узагальненої мережевої моделі діяльності чергової зміни РДЦ. Обрані основні показники для порівняльної оцінки моделей діяльності чергової зміни РДЦ. **Висновки.** Для розширення можливостей узагальненої мережевої моделі діяльності чергової зміни РДЦ було запропоновано ввести додаткові вершини-події, які дозволяють досягти синхронності взаємодії між взаємодіючими диспетчерами та були обрані та обґрунтовані основні показники якості моделей діяльності чергової зміни РДЦ.

Ключові слова: авіаційний диспетчер, районний диспетчерський центр, моделювання діяльності авіаційного диспетчера.

Вступ

Науково-технічний прогрес і пов'язана з ним автоматизація процесів управління істотно змінюють характер і умови праці авіаційних диспетчерів і по новому ставлять проблему врахування людського фактору при організації взаємодії людини і техніки в системі обслуговування повітряного руху. Впровадження нових способів діяльності з обслуговування повітряного руху, підвищення вимог до оперативності та якості вирішення завдань управління обумовлюють необхідність критичного аналізу відомих алгоритмів діяльності авіаційних диспетчерів і визначення напрямків їх вдосконалення на етапах розробки, дослідження і застосування для інформаційного забезпечення роботи і навчання авіаційних диспетчерів.

Крім того актуальним стає питання удосконалення математичного апарату для вибору оптимального алгоритму діяльності авіаційного диспетчера.

Аналіз літератури. Аналіз літератури показав [1, 2, 5, 6], що на сучасному етапі не має достатньо розробленої методики вдосконалення сформованих моделей діяльності авіаційного диспетчера у складі чергової зміни районного диспетчерського центру. Так, не в повній мірі враховано вплив людського фактору на організацію взаємодії між авіаційними диспетчерами в складі чергової зміни районного диспетчерського центру (РДЦ) та між диспетчерами та засобами автоматизації. Даний факт тягне за собою необхідність вдосконалення існуючих методів вибору алгоритму дій авіаційних диспетчерів, шляхом більш повного врахування всіх факторів (включаючи людський), що впливають на функціонування чергової зміни РДЦ.

Мета статті. Метою статті є розширення можливостей узагальненої мережевої моделі при моделюванні діяльності чергової зміни та вибір і обґрунтування основних показників для порівняльної оцінки моделей діяльності чергової зміни районного диспетчерського центру.

Основний матеріал

Вибір раціональних алгоритмів дій на основі методу мережевих моделей діяльності. Метод структурно-алгоритмічного аналізу, який зазвичай застосовується для моделювання діяльності, не має достатньо розробленої методики вдосконалення сформованої моделі діяльності.

Одним з напрямків усунення даного недоліку є доповнення методу структурно-алгоритмічного аналізу методом мережевих моделей діяльності (МММ). Відомо, що від описів на мові МСА можливий перехід до мережевої моделі з використанням апарату ПЕРТ або до мережі Петрі. При цьому модифіковані часові мережі Петрі рекомендується використовувати для імітаційного моделювання систем підтримки прийняття рішень, а моделі ПЕРТ – для подання та вивчення комплексів взаємопов'язаних робіт і управління ними, що має значення в процесі вдосконалення моделі.

Для традиційного способу використання МММ властиві наступні недоліки:

- неможливість моделювання процесів, що включають роботи з неоднозначним результатом, який визначається випадковими чинниками або діями інших систем;
- складність відображення на мережевому графіку альтернативних варіантів досягнення цілей;
- неформальний характер процесу оптимізації мережевого графіка, що базується на досвіді та інтуїції його упорядника.

Так як для процесу роботи чергової зміни РДЦ характерні багатоваріантність і неоднозначність результатів, зазначені недоліки ускладнюють застосування МММ для моделювання діяльності авіаційних диспетчерів. Значною мірою подолати недоліки традиційного МММ дозволяє узагальнена мережева модель, що передбачає введення вирішуючих вершин-подій, що дає можливість приймати до уваги альтернативні варіанти вирішення задачі. Але і узагальнена мережева модель діяльності не враховує

особливості організації взаємодій диспетчерів в реальному масштабі часу.

Для розширення можливостей узагальненої мережевої моделі при моделюванні діяльності чергової зміни пропонується ввести вершини-події "готовність до взаємодії" і "закінчення взаємодії", які з'єднуються "роботами взаємодії". При цьому природною умовою синхронності взаємодії буде рівність критичних шляхів, пов'язаних з попередніми діями взаємодіючих диспетчерів:

$$\begin{aligned} L_1^*(k) &= \max_{L_1} \left(\sum_{(i,j) \in L_1} t(i,j) \right) = \\ &= L_2^*(k) = \max_{L_2} \left(\sum_{(m,n) \in L_2} t(m,n) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

де $(i,j), (m,n)$ – роботи першого і другого диспетчерів, які беруть участь у взаємодії; $t(i,j), t(m,n)$ – тривалість робіт взаємодіючих диспетчерів; $L_1^*(k), L_2^*(k)$ – критичні шляхи від вихідної події до k -ої події "готовність до взаємодії" для 1-го і 2-го диспетчерів відповідно.

Невиконання указаних умов може призвести до ряду наступних наслідків. При напрямку взаємодії від першого диспетчера до другого (наприклад, перший диспетчер видає команду, а другий її приймає і т.п.) в разі $L_1^*(k) > L_2^*(k)$ для другого диспетчера характерні витрати часу на сподівання взаємодії, а в разі $L_1^*(k) < L_2^*(k)$ в умовах видачі команди керівником польоту без урахування закінчення дій диспетчером відбудеться накладення взаємодії на реалізований диспетчером алгоритм діяльності. У першому випадку з'являються елементи сподівання і диспетчери виявляються нерівномірно завантаженими, у другому випадку можливо неправильне сприйняття команди і зрив виконання задач управління.

Для того, щоб домогтися реалізації умови (1) і уникнути зазначених негативних наслідків, необхідно перетворити вихідну мережеву модель. При цьому можуть бути використані такі прийоми структурних перетворень:

- видалення або додавання дуг і їх переорієнтація (інверсія);
- заміна деякого підграфа однією вершиною (стягування, склеювання вершин);
- видалення підграфа з заміною дуг, які виключаються;
- додавання деякого підграфа або вершини з дугами;
- заміна деякої вершини підграфом (розщеплення вершини);
- заміна послідовного виконання робіт паралельним (розчленування великих робіт так, щоб наступні роботи могли початися після виконання частини розглянутої роботи).

Оцінка критичних шляхів різних варіантів перетворень мережевих моделей може проводитися тільки на основі знання статичних характеристик тих чи інших робіт – математичного сподівання і дисперсії

їх тривалості. Так як кожна робота в досліджуваних системах являє собою сукупність елементарних операцій (перенесення погляду, переміщення руки, натискання кнопки і т.п.), час її виконання можна розглядати як суму деякого числа незалежних випадкових величин, підпорядкованих нормальному закону розподілення.

Але в зв'язку з тим, що психофізіологічні можливості людини обмежені, час виконання роботи не може бути менше деякої величини t_{\min} . Це призводить до необхідності трансформування розподілення тривалості роботи в усичене знизу нормальне розподілення з параметрами:

$$\bar{t}_y = \sum_{i=1}^k t_i; \sigma_y^2 = \sum_{i=1}^k \sigma_i^2, \quad (2)$$

де k – кількість операцій, що входять в операційний елемент, t_i, σ_i^2 – математичне сподівання і дисперсія тривалості j -ої операції.

Функція щільності ймовірності для усиченого нормального розподілення з точкою усичення t_{\min} визначається відношенням:

$$f(t) = \begin{cases} \frac{c}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-t_u)^2}{2\sigma_u^2}\right), & \text{при } t > t_{\min}; \\ 0, & \text{при } t < t_{\min}, \end{cases} \quad (3)$$

де t_u, σ_u^2 – математичне сподівання і дисперсія вихідного нормального розподілення; c – нормуючий множник.

Моменти усиченого нормального закону \bar{t}_y, σ_y^2 пов'язані з моментами вихідного закону в такий спосіб (при $t_{\max} = \infty$):

$$\bar{t}_y = \bar{t}_u + \sigma_u B, \quad (4)$$

$$\sigma_y^2 = \sigma_u^2 (1 - B^2 - tB), \quad (5)$$

$$U = (t_{\min} - \bar{t}_u) / \sigma_u^2, \quad (6)$$

$$B_1 = \frac{c}{\sqrt{2\pi}} e^{-U^2/2} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} [0,5 - \Phi_0(U)]} e^{-U^2/2}, \quad (7)$$

де $\Phi_0(U)$ – функція Лапласа-Гауса.

В результаті рішення наведеної системи рівнянь можуть бути знайдені величини \bar{t}_y, σ_y^2, c . Однак, так як безпосереднє аналітичне рішення цієї системи рівнянь досить трудомістке, можна скористатися графічним методом. Для цього визначається

$$B_2 = (\bar{t}_y - \bar{t}_u) / \sigma_u. \quad (8)$$

Після цього графічно будуються функції $B_1 = f_1(\bar{t}_u)$ та $B_2 = f_2(\bar{t}_u)$. Значення \bar{t}_u , яке задовольняє рівності $B_1 = B_2$, буде шуканим. Значення

σ_u , необхідне для побудови $f_1(\bar{t}_u)$ та $f_2(\bar{t}_u)$ знаходиться з виразу:

$$\sigma_u^2 = \sigma_y^2 + (\bar{t}_y - \bar{t}_u)^2 + (t_{\min} - \bar{t}_u)(t_y - t_u). \quad (9)$$

Після визначення \bar{t}_u і σ_u^2 з виразу для B_1 може бути знайдена величина нормуючого множника c і побудована функція щільності часу виконання роботи диспетчерів. Функція своєчасності виконання роботи авіаційним диспетчером дорівнює:

$$q(t) = p\{t_{on} < t\} = c \times \int_{t_{\min}}^t f(t_u) dt_u = c \left[\Phi_0\left(\frac{\bar{t}_u - t_{\min}}{\sigma_u}\right) - \Phi_0\left(\frac{t - \bar{t}_u}{\sigma_u}\right) \right]. \quad (10)$$

З урахуванням розглянутих положень рішення задачі побудови моделі діяльності чергової зміни РДЦ пропонується здійснювати в такому порядку:

1. Вибираються найбільш складні для освоєння фрагменти роботи в типових ситуаціях, пов'язані зі значним числом операційних і вирішуючих елементів та ті, які роблять істотний вплив на пропускну здатність АСУ.

2. На основі описів діяльності окремих диспетчерів, наведених в керівництвах (інструкціях), за відповідними матрицями складності і ізоморфними їм графам будується структурно-алгоритмічна модель роботи чергової зміни РДЦ і цілому.

3. За допомогою аналізу елементів загальної матриці складності з урахуванням умов щодо кількості операцій, що підлягають виконанню одним диспетчером виявляється характер взаємодій між диспетчерами і будується узагальнена мережева модель діяльності.

4. Оцінюються критичні шляхи до подій "готовність до взаємодії" для різних диспетчерів і з використанням прийомів структурних перетворень мережевих моделей домагаються виконання умови синхронності дій чергової зміни (1).

5. З урахуванням накопиченого досвіду застосування АСУ уточнюються витрати часу на виконання операційних та вирішуючих елементів і на основі співвідношень (2 – 10) визначаються показники розподілу тривалості виконання задачі.

Обґрунтування показників для порівняльної оцінки якості моделей діяльності чергової зміни РДЦ із змінною структурою. З урахуванням виявленої структури в загальному випадку модель діяльності чергової зміни РДЦ може характеризуватися видом узагальненої ситуації для якої вона розроблена, складністю алгоритму діяльності та часовими і імовірнісними показниками. Відомо, що для кількісної оцінки алгоритму діяльності застосовано такі абсолютні показники, як сумарна динамічна інтенсивність, логічна складність і стереотипність.

Сумарна динамічна інтенсивність характеризує кількість дій, виконуваних авіаційним диспетчером за одиницю часу, і визначається виразом:

$$d = N/T_3, \quad (11)$$

де N – загальне число дій диспетчера при реалізації алгоритму; T_3 – середній час рішення задачі.

Для методу побудови моделей діяльності на основі структурно-алгоритмічного і мережевого підходів в якості параметра N пропонується використовувати сумарне число операційних і вирішуючих елементів алгоритму діяльності, а як параметр T_3 – математичне сподівання реальних витрат часу.

Показник стереотипності оцінюється за наявністю в алгоритмі діяльності безперервних послідовностей операційних елементів і тривалості цих послідовностей. Показник логічної складності пов'язаний з необхідністю перебудови системи дій в разі зміни поточних ситуацій.

Прийнято проводити оцінку стереотипності і логічної складності через нормовані коефіцієнти. Нехай алгоритм складається з N елементів (N_{on} операційних елементів і N_p вирішуючих елементів). Розіб'ємо алгоритм діяльності на n комплексних груп (наприклад, за кількістю диспетчерів, що беруть участь в реалізації алгоритму). Нехай кожна i -та комплексна група містить m_i елементів, причому з них m_{oni} операційних і m_{pi} вирішуючих.

При цьому відношення N_{on}/N характеризує частку операційних елементів в алгоритмі; а відношення m_{oni}/N_{on} та m_{oni}/m_i – розподілу елементів по групах. Тоді можна записати вираз для нормованого коефіцієнта стереотипності:

$$K_{cm} = \sum_{i=1}^n \frac{N_{on}}{N} \cdot \frac{m_{oni}}{N_{on}} \cdot \frac{m_{oni}}{m_i}, \quad (12)$$

$$K_{cm} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{m_{oni}^2}{m_i}, \quad (13)$$

За аналогією можна визначити співвідношення і для нормованого коефіцієнта логічної складності:

$$K_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{m_{pi}^2}{m_i}, \quad (14)$$

Але наведені показники не враховують такий істотний момент, як можливість непродуктивних витрат часу в результаті сподівання диспетчерами взаємодій, тобто наявність в комплексних групах елементів сподівань. За аналогією з попередніми висловлюваннями пропонується ввести співвідношення для нормованого коефіцієнта сподівань:

$$K_{ож} = \frac{1}{N^*} \sum_{i=1}^n \frac{m_{ожі}^2}{m_i}, \quad (15)$$

де N^* – сумарне число елементів алгоритму з урахуванням елементів сподівань.

Крім того, важливим показником алгоритму діяльності, який є характерним для чергової зміни РДЦ і впливає на оперативність вирішення задачі управління, є число взаємодій між диспетчерами V .

Для виявлення часових і імовірнісних показників узагальної мережевої моделі діяльності в силу багатоваріантності процесу роботи чергової зміни РДЦ необхідно визначити множину шляхів реалізації алгоритму діяльності з урахуванням можливих результатів вирішальних подій. В даному випадку можуть бути використані формули логіки висловлювань і таблиці істинності. При цьому слід враховувати, що два шляхи, що виходять з вирішальної події, вважаються "кон'юнктивними", якщо їх початкові операції повинні бути спільно або виконані, або ні. Якщо з цих операцій реалізується тільки одна, а інша виключається, то такі шляхи вважаються "диз'юнктивними".

Загальні витрати часу на реалізацію даного варіанту алгоритму діяльності (на досягнення одного з можливих кінцевих подій) будуть відповідати сумі витрат часу на виконання робіт, що лежать на критичному шляху для зафіксованих результатів вирішальних подій. Облік апріорних ймовірностей, пов'язаних з критичним шляхом, дозволяє обчислити вірогідність тих чи інших кінцевих подій.

Одним з показників узагальної мережевої моделі діяльності чергової зміни РДЦ є ступінь невизначеності (ентропія) процесу роботи. В якості міри невизначеності в ситуаціях дихотомічного вибору доцільно використовувати співвідношення:

$$E = -\frac{1}{\log_2 M} \sum_{i=1}^M p_i \log_2 p_i, \quad (16)$$

де M – число можливих варіантів реалізації процесу діяльності; p_i – ймовірність реалізації i -го варіанту алгоритму діяльності; $\log_2 M$ – максимальна ентропія процесу діяльності (при рівності всіх апріорних ймовірностей альтернатив результатів вирішальних подій).

Всі розглянуті показники і параметри в ході вдосконалення моделей діяльності можуть змінюватися. Для характеристики ступеня зміни того чи іншого показника (параметра) на j -му етапі розробки моделі доцільно використовувати відносні коефіцієнти такого вигляду:

$$\delta_j = \left| \frac{a_j - a_{j-1}}{a_{j-1}} \right|, \quad (17)$$

де a_j , a_{j-1} – значення показника на j -му етапі розробки та досягнуте на $j-1$ -му етапі розробки.

У якості складових a_j , a_{j-1} можуть використовуватися значення N , T_3 , d , V , K_{cm} , K_d , $K_{ож}$ і т.д.

У зв'язку з тим, що характеристики роботи авіаційного диспетчера в силу їх схильності до впливу великої кількості факторів об'єктивного і суб'єктивного характеру (рівень навченості, динаміка працездатності, психологічні особливості і т.д.) є випадковими величинами, їх визначення має вестися статистичними методами. Відомо, що застосування статистичних критеріїв дозволяє отримати оцінки параметрів в процесі інженерно-психологічних вимірювань, проведених як методами імітаційного

моделювання, так і експериментальними методами.

Відомо, що достовірність статистичних вимірювань залежить від обсягу експерименту (числа дослідів). Обраний для аналізу діяльності чергової зміни РДЦ поєднання структурно-алгоритмічного і мережевого методів в силу наочності і відносної простоти структурно-алгоритмічного підходу дозволяє залучити до моделювання діяльності та визначення її показників поряд із фахівцями науково-дослідних і навчальних організацій, фахівців системи обслуговування повітряного руху. Це дає можливість значно збільшити число опитів, використовуваних для визначення характеристик діяльності, і, відповідно, підвищити точність вимірювань.

Будь-яке вимірювання являє собою порівняння з певним еталоном. Як еталон можуть виступати ймовірності настання певних подій (наприклад, ймовірність безпомилкової роботи) або математичні сподівання при використанні безперервних випадкових величин (наприклад, час виконання завдання).

Порівняння математичних сподівань проводиться за допомогою статистичного критерію Стьюдента (t -критерію) за формулою:

$$|M_x - M_э| \geq t_{i-p} \sigma \sqrt{\frac{1}{N_x} + \frac{1}{N_э}}, \quad (18)$$

де M_x – математичне сподівання досліджуваної величини x ; $M_э$ – еталонне значення; t – табличне значення t -критерію на рівні значущості α ; σ – середньоквадратичне відхилення значень вимірів; N_x , $N_э$ – число дослідів, проведених для визначення досліджуваної і еталонної величин.

При виборі еталона слід враховувати, що він повинен бути характеристикою для деяких спеціальних умов, які можна прийняти за початкові (вихідні).

Якщо характеристикою є ймовірність деякої події, то шукана величина визначається з виразу:

$$|p_x - p_э| \geq \sqrt{2} U_{i-p}, \quad (19)$$

де U – квантиль стандартного нормального розподілу. Величини \tilde{p}_x та $\tilde{p}_э$ описуються як:

$$\tilde{p}_x = 2\sqrt{N_x} \arcsin \sqrt{p_x}, \quad (20)$$

$$\tilde{p}_э = 2\sqrt{N_э} \arcsin \sqrt{p_э}, \quad (21)$$

де p_x – ймовірність настання досліджуваного події; $p_э$ – еталонне значення ймовірності.

Значення $M_x(P_x)$, при якому вирази (18) та (19) перетворюються в рівності, є критичним: в цьому випадку різниця між величинами M_x та $M_э$ (p_x и $p_э$) стає значущою.

Після визначення характеристик існуючої і знову розробленої моделей діяльності необхідно вирішувати задачу їх співставлення. Досягнення поліпшення хоча б однієї характеристики може оцінюватися позитивно, що відповідає альтернативній

(диз'юнктивній) стратегії прийняття рішень при оцінці корисності результатів.

Висновки

Для розширення можливостей узагальненої мережевої моделі при аналізі діяльності чергової зміни РДЦ запропоновано ввести вершини-події "готовність до взаємодії" і "закінчення взаємодії", які з'єднуються "роботами взаємодії". При цьому умовою синхронності взаємодії буде рівність критичних шля-

хів, пов'язаних з попередніми діями взаємодіючих диспетчерів. Виходячи з аналізу застосовності відомих характеристик діяльності авіаційних диспетчерів для моделей діяльності із змінною структурою в якості основних показників для порівняльної оцінки моделей обрані число операційних і вирішуючих елементів алгоритму, сумарна динамічна інтенсивність дій, нормовані коефіцієнти стереотипності, логічної складності, сподівань, тимчасові і імовірнісні показники і ступінь їх відхилення від вихідних значень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гришманов Е. А. Методы интенсификации процессов формирования навыков распознавания и устранения потенциально-конфликтных ситуаций персоналом ОВД / Е. А. Гришманов, Ю. В. Чинченко, И. Е. Буланов // Научные работы академии: выпуск III, часть II. – Кировоград : ДЛАУ, 1998. – С. 16-21.
2. Залежність функціональних станів оператора від комплексу зовнішніх та внутрішніх факторів при роботі з АСУ / М. А. Павленко, О. А. Черток, Є. А. Толкаченко, В. П. Ясинецький // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. – 2017. – № 4. – С. 111-114.
3. Математические основы эргономических исследований: монография / П. Г. Бердник, Г. А. Кучук, Н. Г. Кучук, Д. Н. Обидин, М. А. Павленко, А. В. Петров, В. Н. Руденко, А. И. Тимочко. – Кропивницкий : КЛА НАУ, 2016. – 248 с.
4. Онипченко П. Н. Управление воздушным движением и перспективные направления его совершенствования / П. Н. Онипченко, М. А. Павленко, А. И. Тимочко // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2015. – № 2. – С. 38-41.
5. Чинченко Ю. В. Подходы к автоматизации контроля уровня готовности авиадиспетчеров к действиям в кризисных ситуациях / Ю. В. Чинченко // Искусственный интеллект. – Донецк: «Наука і освіта», 2003. – № 4. – С. 378-383.
6. Чинченко Ю. В. Автоматизация управления уровнем готовности авиадиспетчеров к действиям в кризисных ситуациях / Ю. В. Чинченко // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии в управлении и профессиональной подготовке операторов сложных систем». – Кировоград: ГЛАУ, 2003. – С. 67-68.
7. Анализ методов моделирования деятельности оператора в системе "человек-машина" / О. В. Сергунова, М. А. Павленко, А. И. Тимочко, Е. В. Воробьев // Системи обробки інформації. – 2015. – № 7. – С. 80-82.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М. А. Павленко,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 28.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.05.2018

Метод выбора рациональных алгоритмов действий авиационного диспетчера

Д. Э. Гришманов

Предметом изучения в статье являются процессы деятельности авиационных диспетчеров дежурной смены районного диспетчерского центра (РДЦ) системы обслуживания воздушного движения. **Целью** является разработка метода выбора рациональных алгоритмов действий авиационного диспетчера при обслуживании воздушного движения. **Задачи:** обосновать возможность применения сетевых моделей для выбора алгоритма действий авиационного диспетчера. Применяемыми **методами** являются: метод структурно-алгоритмического анализа и метод сетевых моделей деятельности. Получены следующие **результаты**. Предложены пути расширения возможностей обобщенной сетевой модели деятельности дежурной смены РДЦ. Выбраны основные показатели для сравнительной оценки моделей деятельности дежурной смены РДЦ. **Выводы.** Для расширения возможностей обобщенной сетевой модели деятельности дежурной смены РДЦ было предложено ввести дополнительные вершины-события, которые позволяют достичь синхронности взаимодействия между взаимодействующими диспетчерами и были выбраны и обоснованы основные показатели качества моделей деятельности дежурной смены РДЦ.

Ключевые слова: авиационный диспетчер, районный диспетчерский центр, моделирование деятельности авиационного диспетчера.

Method of selecting rational algorithms of action by the aviation dispatcher

D. Grishmanov

The **subject matter** of the article is the processes of the activity of air controllers on duty shift of the area control center (ACC) of the air traffic services system. The **goal** is the development of a method for selecting rational algorithms for the actions of an air traffic controller in the maintenance of air traffic. The **tasks** to justify the possibility of applying network models for the choice of the algorithm of the actions of the air traffic controller. The **methods** used are: the method of structural-algorithmic analysis and the method of network models of activity. The following **results** were obtained: The ways of expanding the possibilities of a generalized network model of the activity of the ACC shift on duty are suggested. The main indicators for the comparative evaluation of the models of the activity of the duty shift of the ACC. **Conclusions.** To expand the capabilities of the generalized network model of the activity of the ACC shift on duty, it was suggested to enter additional event vertices that allow synchronization of interaction between the communicating dispatchers and select and substantiate the basic performance indicators for the models of the duty shift operation of the ACC.

Keywords: aviation dispatcher, area control center, modeling of the air controller activities.

N. Ichanska, Yu. Podoshvelev, O. Smitskiy, K. Rybachenko

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

Poltava National V.G. Korolenko Pedagogical University, Poltava, Ukraine

A QUALITY SELECTION OF SOFTWARE TO BUILD A SERVICE OF ELECTRONIC EQUIPMENT SALES

Subject of the study in the article is an explanation of the method of selecting software tools and an example of their use for creating an e-shop, the basis for creating easy-to-use and methods to avoid obvious disadvantages of such services. **Results** - with emphasis on the qualitative selection of software tools which depend on the convenience of the service being created, namely: content management system, hypertext markup language, database management systems. The most used and productive software tools are considered and their advantages and disadvantages are explained, shown as the correct choice of software tools influences the flexibility of development on the example. An algorithm for creating an online store is presented. The main issues that may arise when creating a content management panel for the administrator and when using the service for potential buyers are described. An option to overcome these problems is suggested by using the WordPress content management system and constructing a linear use of the site. **Conclusion** - the method allows to provide competing opportunities in the administration of the service, in the flexibility and simplicity of its development, rational choice of resources and methods used, while not creating a separate admin panel to manage the content of the online store.

Keywords: software tools, online store, content management system, WordPress, databases, hypertext markup language, database management system, competitiveness, development methods.

Introduction

At the modern level of development of technologies there is a huge number of the Internet shops which have the advantages and shortcomings. Usually, such decisions are based on PHP, UI2, JS, AngularJS .NET. A lack of such websites, is the fact that for adding goods it is necessary to create additional functionality.

Analysis of a problem and problem definition.

The task as much as possible to simplify development of such websites is urgent. They have to own the convenient interface, the simplified system of service and the reduced cost. It can be made by means of HTML as language of a hypertext marking and WordPress as a content management system [1-5].

It is necessary for untying of this task: to investigate the market of the Internet shops; to find their faults and benefits; to explain the choice of content management systems; to analyse point by point the sequence of work on the website [6, 7].

The solution of this task gives the chance to develop the Internet shop, management of which happens to the help of a panel in WordPress.

The work purpose - to describe a method of the choice of the software for the effective development of the Internet shop with the convenient interface simplified by system of service and reduced by cost.

During the course of performance this work the following tasks are solved:

- 1) the market of the Internet shops is investigated;
- 2) their faults and benefits are found;
- 3) recommendations about the choice of the software are provided;
- 4) the algorithm of work with services is given.

Practical result of work are recommendations concerning development of program service for sale of the electronic equipment, management, adding, removal of categories or goods, editing their description, cost and characteristics.

Statement of the main material

That the Internet shop was popular and had demand, it is necessary to make it clear for the user, easily accessible and attractive. It is necessary to attach all efforts that the user had no problems with the order of goods because it can otputat it as the potential buyer. Output - the Internet shop has to be ideal to be popular and to make profit.

The ideal Internet shop is:

1. Linear order of actions. Steps within "steps" confuse, push away the buyer. Common example: the sentence to specify "a desirable delivery address" or "to create an accounting record" on the separate page. Then the user is redirected on the previous stage of registration of purchase from where it, roughly speaking, "pulled out" for filling of additional forms. It is important to understand that the mental model of most of buyers provides a consecutive set of actions. Having twice seen the same page, the person is lost and comes to a conclusion that there was an error, or through his fault ("I made something wrong"?), or because of technical faults of the website. To reach linear process, it is enough to direct the user to the following step. It should not be returned before from what having started!

2. Are clear to the description of a field of a form. Sample descriptions of fields of a form can be ambiguous. That the ordinary buyer has to think, having seen the following: "Enter the payment address". What? What address? What do you want from me?! Most often users do not understand what information type interests the Internet shop. Enter in a search line of Google a request "the payment address" and be convinced. Problems with understanding - a powerful argument to refuse purchase.

It is necessary to accompany each field of a form with the accurate, short description, and in certain cases - an example. In liquid cases even the usual point "e-mail address" demands explanations - as it will be used

further. For example, it is possible to specify that to e-mails will come news about future events, etc. As not all users experience similar difficulties, once the instruction hides behind an icon in the form of a question mark or behind the link with the dropping-out text. Technical candidate solutions of this problem more than are enough.

3. Failure from use of contextual words. Treat them "to continue", "further", "back", "to apply", another. Value of these words changes depending on a context. On the page with a basket of goods the continue button means one or the other:

- the choice of goods (we will tell, to find a shirt to these wonderful jeans)

- to issue the order (the buyer with a basketful of goods is already ready to become the happy owner of a shirt and one pair of trousers).

Button "back". Back to search results of goods in the directory? To return to the previous page? To pass to main? These examples clearly demonstrate as contextual words which contents are open for interpretation bring to misunderstanding. Use words which do not change from the page to the page: "to continue the choice of goods", "to pass for payment".

4. Visual confirmation of safety. Its users do not think of safety exactly by that moment when it is necessary to enter payment details. Examinees them doubts can be characterized the phrase "it does not look safely". Yes, for the ordinary user there is no essential difference between mental model of safety and the actual safety. That is, the user will feel more surely if design, form elements, as well as the website in general, install trust. Specially picked up elements of page border, field of a form, icon, icons (the most widespread - the lock), another belong to visual security signals.

5. The form of registration/order placement has to consist of one column. Irrespective of the size of the monitor of the ultimate user, many forget to fill or just do not see the second column of a form. As a rule, only the left column then the user faces the error warning message and a persistent request is filled to fill the passed form fields.

6. Use of the address for drawing of the account, as delivery addresses behind concealing. Most of buyers shop in the Internet shops of the house. If it occurs in working hours, then for delivery to goods the home address all the same is specified. Thus, there is a sense to reduce quantity of fields due to connection of the payment detail and the destination. Also it will reduce probability of the wrong introduction of information and effects: if there was an introduced error, then it is necessary to correct it only in one place.

7. Accurate the instruction on an error source. When the buyer faces a problem when filling the order form, failure probability from purchase considerably grows. At 50% of cases need to independently look for a cause of error or to understand the error message which abounds with technical obscure terms, forces the client to leave the website. The error message can be displayed over upper limit of a form though it would be more correct to show warning in close proximity to a line where there was in-fed information. It is necessary not only point to an error, but also to provide to the user the instruction for its

elimination. Therefore, warning has to have clear, accurate information, be selected, evident (it can be reached contrast and visual indicators).

8. Optional registration. What is the target audience of any online store? These are the modern people who are perfectly informed on such instrument of marketing as e-mail mailing. Almost each website with obligatory registration suggests to be signed for receiving news and other material of advertizing character. Without suspecting anything the user leaves the e-mail address and exactly the countdown from this point begins. How quickly it will place correspondence in the Spam folder? Very quickly. Than more often mailing - the highest chances comes.

The accounting record on the Internet as the admission - it opens all doors. A problem of each active user - a large number of admissions. Therefore the requirement to undergo registration on duty causes irritation, the it is more, so far as concerns spontaneous purchase. Besides, it takes away time and creates obstacles. There is only one decision - unostentatious service. The buyer has to have an option.

Technically it is solved thus. Suggest to be registered on completion of purchase. "You want to create an accounting record? Just enter the desirable password. As login it will be used earlier e-mail is specified by you". Watch how it is simple! Any excess steps, obligations. The buyer is not obliged to create the account, but has an opportunity to make it after purchase. It is it is clear, necessary to list benefits of existence of an accounting record.

9. Lack of demand for excess data. The more expensive order, the more information tells about themselves clients, but it is justified only if personal data of the user are a necessary condition for purchase. For example, phone number. Where logic? Means for communication was already noted (e-mail). If information superfluous in certain cases nevertheless is necessary, at least, explain why. What is obvious to the owner of shop is unevident for the client. The accurate explanation ("phone is necessary for communication with the client in case of problems with delivery") removes any questions and suspicions.

After determination with bases of a yuzabelnost of the website we suggest to deal with what needs to be used for its development and as to do it. The first that is necessary for creation of a visual part of the website - it is language of a hypertext marking. It is for this purpose reasonable to use HTML.

As a content management system we recommend popular WordPress. WordPress is a content management system with the open code. By means of this system it will be possible to add new goods and to direct already added and many another. Let's note that development of a template of the website shall be the first step for creation of the Internet shop. The homepage of the website is the menu which will orient the user on types of goods which attract its interest and it has desire to purchase goods from it. Having selected a certain category, the website has to readdress the user on goods of category which was elected by him. On the page there have to be filters and an opportunity to sort goods

by certain parameters. Having selected goods before purchase, the user it will be readdressed on the page with a basket of goods for their order. The second step is connection of a template to a content management system above the mentioned WordPress. For this purpose it is necessary to create the account of the administrator for the database and to create the database. The administrator will work with it, that is to add goods and to edit данні about them. Also WordPress gives the chance to create filtering and sorting of goods. Why so popular Wordpress? To find out it, we will carry out the small analysis of this CMS. Therefore, work with the Wordpress system begins with its installation on the website. If the website is already placed on a hosting, then and the archive with the Wordpress distribution kit needs to be unpacked at once in the folder of the website which is on the server.

If the website meanwhile is on the local computer, then for work from Wordpress it is required to establish and configure previously the software - the local server (for example, SCO OpenServer) and SKBD (for example, MySQL) or already ready packet, for example Denwer. At what, for the WordPress installation the web hosting (or the local server) has to support PHP version 4.3 or above and MySQL of version 4.0 or above.

Using the MySQL control bar, it is necessary to create the database for Wordpress so that the user of MySQL had all access rights to this base.

The following step it is necessary to rename the wp file - config - sample.php into wp - config.php and to make changes to this file - to enter the user name of the database and the password. It is possible to make these changes in two ways. The first is to open the wp file - config.php by means of a text editor (for example, a notepad) and to manually register all settings. Or the second method - to register a way to the wp file in a line of the browser - config.php and to adhere to instructions. For access to management of the website to Wordpress it is necessary to prescribe in a line of the browser a way "to http://_m'ya website/wp - login.php" - and you will get to an administrator panel.

The administrator Wordpress panel is a special control bar which contains several sections.

The section "Write" allows to create new record or the separate page. This record can be published at once or to save and publish later.

In the section of "Management" it is possible to review, change or delete the created records, pages or headings, and also to work with comments of visitors.

The section "Links" allows to manage references which are contained on the homepage. References in this section can be added, deleted, changed, added the description, to create sections of links.

If you want to edit appearance of a template of the website - come into the section "Appearance". In this section you can use "That editor". And if you want to establish a ready subject of registration, then you can copy files of a subject in wp directory - content/themes and in division of "Subject" to select the copied subject.

The section "Plug-ins" allows to install in Wordpress plug-ins - additional files which add functionality. For installation of a plag_n just it is

necessary to copy its file in the wp folder - content/plugins. In the section "Users" the site administrator can manage accounting records of users of the website: to add new users, authors, to change their data or to delete accounting records.

In the section "Setup" it is possible to perform various tunings of the Wordpress system. In this section it is possible to configure the access level of users, to configure actions of system in response to actions of visitors, to create the name and the description of the Internet shop, an arrangement of directories and a lot of things another. The content management system of Wordpress has several advantages:

- it allows to carry out the instant publication of records;
- is free;
- it provides management of pages;
- it gives an opportunity to password protection of pages and posts;
- in Wordpress the integrated tape of friendly blogs;
- the established protection against spam in comments;
- it simple in installation, it is easy to update or modify it;
- it it is possible to administer several authors;
- in Wordpress PHP and MySQL are used;
- easy setup віджетів;
- the built-in editor of the HTML pages has;
- automatic adding the corresponding menu items after creation of new publications in appropriate sections;
- has an opportunity to carry the publication to several categories;
- has the open code.

Of course, the most important benefit of WordPress which allowed to win wide popularity - its free of charge. That is everyone who wanted create the own website could make without excess expenses and attachments it by means of WordPress. There is a huge number of other free engines, but WordPress subdued all the simplicity of establishment, setup and use. Everything is extremely clear and available.

It is possible to add content on the website by means of the visual editor who is not more difficult to the interface in Word. Adm_n-panel it is intuitively clear to all and everyone, it is possible to master it for very short time. To expand functionality of the website, it is enough to install necessary plug-ins.

Most of them as well as templates, are in free access. If it is necessary to make changes to reflection, style or structure of the website, it can be made, koreguyuch a code in files of a subject. Structure of the WordPress template, hierarchy of its files also relatively simple, in comparison with CMS Joomla.

Besides, thanks to the popularity, at forums and the specialized websites you will be able to find answers to all possible questions on work with given by the engine. Also thanks to work of developers and simple installation of official updates of system, the websites on Wordpress are adequately protected from infections. And vulnerabilities that arise, rather quickly are eliminated. Wordpress usually has also shortcomings, especially it is worth selecting the following:

- rather powerful load of the server;
- occasionally low speed of loading of the website;
- limited set of basic functions;
- duplications of pages and images;
- a large number of low-quality subjects and additions with errors;
- relative mistrust of search engines to the websites on free engines.

The WordPress engine, and especially large number of additions to it can significantly load the server on which the website is located. In order to avoid excessive loading it is necessary to reduce quantity of the installed plug-ins to a necessary minimum. Besides, it is important to place the blog on a qualitative hosting. These options will help to increase the speed of loading of the website also. Also, for acceleration of work of the website it is necessary to optimize the database and to use a plug-in for a caching of pages.

One of shortcomings of WordPress is the fact that it automatically generates doubles of pages. Also the engine of Wordpress when loading pictures creates their copies of the different sizes. For removal of unnecessary pictures it is possible to use a plug-in of DNUI (Deletenotusedimage).

It is also desirable to use the checked additions that your website worked regularly and without errors. And before installation of a template, it is necessary to check its plug-in TAC.

Popularity of WordPress - its advantage and a shortcoming at the same time. Search engines belong watchfully to the young websites on WordPress and on other free CMS.

At first possibilities of a resource are limited to feature set which are mortgaged in a basis of the engine and the established template. For expansion of opportunities it is possible to use plug-ins, however, their large number can affect the speed of work of the website. In this case it is possible to make in addition changes to files of a template, to add new functions by means of editing a code. However, the corresponding skills, or services of the specialist for this purpose will be necessary. Therefore it is important to define at first the purposes, a type, structure and necessary opportunities for the resource. Depending on it to select the most suitable management systems with optimum feature set.

It is necessary to consider more in details further HTML because work with it will be the following step.

At first the speech of HTML was conceived and created as means of structurization and formatting of documents without their binding to means of a reconstruction (reflection). Ideally, the text with a marking of HTML had to be recreated without stylistic and structural distortions on the equipment with different technical equipment (the color screen of the modern computer, the monochrome screen of an organizer limited behind the sizes the screen of the mobile phone or the device and the program of a voice reconstruction of texts). However the modern HTML application very in the distance from its initial task. For example, the tag <table> is intended for creation in documents of tables, but is sometimes used also for registration of placement of elements on the page.

Eventually the main idea a platformozavisimost of the HTML language was sacrificed to the modern needs for multimedia and graphic design. HTML - a tag markup language of documents. Any document in the HTML language is item collection, and the beginning and the end of each element is designated by special marks - tags. Elements can be empty, that is do not contain any text and other data (for example, a tag of a rupture of the lines
). In this case the closing tag usually is not specified. Besides, elements can have attributes which define any their properties (for example, type size for a tag). Attributes are specified in a tag which opens.

Proceeding from this information, it is possible to note that the HTML language it is extremely necessary for development for _nterent-shop.

The database which will contain goods, their description and another it is necessary to administer.

phpMyAdmin - web addition with the open code in the PHP language with a graphic web interface for administration of the MySQL or MariaDB database. PhpMyAdmin allows to carry out administration of the MySQL server via the browser, to start SQL requests, to review and edit contents of tables of databases.

This program enjoys wide popularity at web developers as allows to direct the MySQL database without input of the SQL teams via the friendly interface and from any computer connected to the Internet without the need for establishment of the additional software.

Today phpMyAdmin is widely put into practice. The last is connected with the fact that developers intensively develop the product, considering all innovations of SKBD MySQL. The vast majority of the Ukrainian providers use this zastosunok as a control bar to give to the clients an opportunity of administration of the databases selected with it.

The program is distributed under the license GNU GeneralPublicLicense and therefore some other developers integrate it into the developments, for example XAMPP, Denwer.

MySQL - a free relational database management system. MySQL was developed by the TsH company for speeding up of processing of big databases. This database management system (SKBD) with the open code was created as an alternative to commercial systems. MySQL from the very beginning was very similar to mSQL, however over time it all extended and now MySQL - one of the most widespread database management systems. It is used, first of all, for creation of dynamic web pages as has wonderful support from various as if programming.

SCO OpenServer (before SCO UNIX and SCO OpenDesktop) - the version of the Unix operating system closed source developed by the SantaCruzOperationruen (SCO) company also extends SCO Group.

SCO OpenServer 5, operating system on the basis of UNIX System V Release 3, was for the first time released by SantaCruzOperation in 1992. SCO Open Server 5 by this time continues to be supported by SCO.

SCO OpenServer 6, operating system on the basis of UNIX System V Release 4.2mp, was released by SCOGROUP in 2005. In it were added the support of big

files, memories a lot of flowing kernels. SCO OpenServer 6 contains the kernel of UnixWare 7 SVR5 integrated with additions and the priznacheena for use of the OpenServer environment. Open Server is the portable server platform and software environment created especially for web developers taking into account their recommendations and wishes.

The program complex has the rich set of the server software, convenient, the multifunction thought-over interface, has powerful opportunities from administration and setup of components. The platform is widely used for the purpose of development, adjustment and testing of web projects, and also for providing web services on the local area networks.

though at first software products which are a part of a complex were not developed especially for work the

friend from the friend, such sheaf became very popular among users of Windows, first of all because they received a free complex of programs with reliability at the level of Linux of servers. Open Server - the reliable tool is necessary for each web master.

Summarizing: for creation of the Internet shop it is possible to use WordPress as a content management system, HTML for a marking of the hypertext page, PhpMyAdmin for administration of SKBD MySQL.

Conclusion

The correct use of the considered method and the selected software allow to create competitive Internet shop with the minimum sentries and material costs. what will be convenient for its administration both visually attractive and intuitively clear to users.

REFERENCES

1. WordPress, available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/WordPress>.
2. HTML, available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/HTML>.
3. Benefits of use Wordpress, available at: <https://inneti.com.ua/it/it-posluhy/perevahy-korystuvannya-wordpress/>
4. Evaluation CMS Wordpress, available at: <http://webstudio2u.net/ua/site-develop/147-wordpress.html>
5. PhpMyAdmin, available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/PhpMyAdmin>.
6. SCO OpenServer, available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/SCO_OpenServer.
7. Kuchuk G., Kharchenko V., Kovalenko A., Ruchkov E. Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems. *East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. 2016. Pp. 1-6. doi:<https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.
8. MySQL, available at: <https://uk.wikipedia.org/wiki/MySQL>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. В. Шульга,

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

Received (Надійшла) 04.04.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

Якісний вибір програмних засобів для побудови сервісу з продажу електронної техніки

Н. В. Ічанська, Ю. Г. Подошвелев, О. В. Смицький, К. А. Рибаченко

Предметом вивчення в статті є пояснення методу вибору програмних засобів та приклад їх використання для створення електронного магазину, основи створення простого у користуванні і методи уникнення явних недоліків таких сервісів. **Результати** – акцентовано увагу на якісний вибір програмних засобів від яких залежить зручність створюваного сервісу, а саме: системи керування вмістом сайту, мови гіпертекстової розмітки, системи керування базами даних. Розглянуто найбільш вживані та продуктивні програмні засоби та пояснено їх переваги і недоліки, показано як правильний вибір програмних засобів впливає на гнучкість розробки на прикладі. Подано алгоритм створення інтернет-магазину. Описано основні проблеми, які можуть виникати при створенні панелі керування вмістом для адміністратора та при користуванні сервісом для потенційних покупців. Запропоновано варіант подолання цих проблем шляхом використання системи керування вмістом WordPress та побудови лінійного користування сайтом. **Висновок** – метод дозволяє забезпечити конкуруючі можливості в адмініструванні сервісу, в гнучкості та простоті його розробки, раціональному виборі використовуваних ресурсів і методів, при цьому не створюючи окрему адміністраторську панель для керування наповненням інтернет-магазину.

Ключові слова: програмні засоби, інтернет-магазин, система керування вмістом, WordPress, бази даних, мова гіпертекстової розмітки, система керування базами даних, конкурентоздатність, методи розробки.

Качественный выбор программных средств для построения сервиса по продаже электронной техники

Н. В. Ичанская, Ю. Г. Подошвелев, О. В. Смицкий, К. А. Рыбаченко

Предметом изучения в статье есть объяснение метода выбора программных средств и пример их использования для создания электронного магазина, основы создания простого в использовании и методы избежания явных недостатков таких сервисов. **Результаты** - акцентировано внимание на качественный выбор программных средств от которых зависит удобство создаваемого сервиса, а именно: системы управления содержимым сайта, языка гипертекстовой разметки, системы управления базами данных. Рассмотрены наиболее употребительные и производительные программные средства и объяснено их преимущества и недостатки, показано как правильный выбор программных средств влияет на гибкость разработки на примере. Представлен алгоритм создания интернет-магазина. Описаны основные проблемы, которые могут возникать при создании панели управления содержанием для администратора и при пользовании сервисом для потенциальных покупателей. Предложен вариант преодоления этих проблем путем использования системы управления содержимым WordPress и построения линейного пользования сайтом. **Вывод** - метод позволяет обеспечить конкурирующие возможности в администрировании сервиса, в гибкости и простоте его разработки, рациональном выборе используемых ресурсов и методов, при этом не создавая отдельную администраторскую панель для управления наполнением интернет-магазина.

Ключевые слова: программные средства, интернет-магазин, система управления содержимым, WordPress, базы данных, язык гипертекстовой разметки, система управления базами данных, конкурентоспособность, методы разработки.

О. В. Коваленко

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

МЕТОДИ ЯКІСНОГО АНАЛІЗУ ТА КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ РИЗИКІВ РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

В роботі визначено і вирішено одне з протиріч, що виникають при розробці ПЗ, яке полягає в нехтуванні фірмами-розробниками ПЗ факторів вразливості безпеки ПЗ. Усі ризики при розробці програмного забезпечення, з більшим або меншим допущенням, можна вважати суб'єктивним результатом виконання процесу, який пов'язаний з нестачею кількісної або якісної інформації про процес, а також її невизначеністю. Зазначені фактори можна вважати головною причиною, яка породжує і супроводжує ризики у всьому їхньому життєвому циклі. В якості вирішення зазначеної проблеми запропоновано використання розроблених методів якісного аналізу та кількісної оцінки ризиків розробки програмного забезпечення. Його відмінною особливістю є врахування факторів експлуатаційних ризиків, особливо ризику невиявлення вразливостей ПЗ і оцінки довольного несуперечливого кінцевого набору «квантів інформації». Доведено, що методика якісної оцінки ризиків проекту є описовою і являє собою процес, спрямований на виявлення конкретних ризиків проекту, а також причин, що їх породжують, з подальшою оцінкою можливих наслідків і вироблення заходів для роботи з ризиками. У процесі якісного аналізу ризиків відбувається вироблення метрик, що відповідають за визначення граничних показників факторів, які сигналізують про прояв ризиків. Розроблено метод кількісної оцінки ризиків розробки ПЗ. Його відмінною особливістю є комплексне використання методики «Аналізу дерева відмов» і способу оцінки показника чистої приведеної вартості проекту розробки ПЗ з урахуванням негативних факторів можливого невиявлення вразливостей безпеки ПЗ. У той же час використання способу оцінки показника чистої приведеної вартості проекту розробки ПЗ дозволяє розглядати проект комплексно, з урахуванням необхідності врахування безпеки і тестування вразливості ПЗ із залученням інструментів, які дозволяють подолати складність, невизначеність і довгостроковість проектів.

Ключові слова: оцінка ризиків, розробка програмного забезпечення.

Постановка проблеми дослідження та аналіз літератури

В даний час у більшості організацій і підприємств різних форм власності все більше уваги приділяється питанням аналізу та оцінки ризиків. Але, не дивлячись на це, проблеми та питання, що відносяться до загальної теорії та методології аналізу, оцінки й управління ризиками, потребують адаптації до підходів і положень сучасного менеджменту, врахування нових факторів становлення і розвитку технологій, об'єднання відомих «усталених» положень теорії ризиків з новими, прогресуючими підходами аналізу і синтезу.

Аналіз літератури [1-8] показав, що, не дивлячись на достатньо глибоку історію розвитку поняття «ризик» і спроби ряду відомих авторів сконцентрувати свої розробки в області управління ризиками окремих галузей і напрямів діяльності, розробка нових, перспективних наукових положень в цій області все ж дещо «звужена» фінансовою діяльністю. В той же час широке використання в нашій роботі інформаційних технологій потребує підвищеної уваги до цього напрямку, і відповідно, більш глибокого висвітлення питань ризик-менеджменту ІТ-індустрії.

Суттю будь-якого процесу, явища або об'єкта (в тому числі й інформаційної складової) є діяльність, яка приводить до формування результатів. У застосуванні до такого напрямку діяльності, як розробка програмного забезпечення, кінцевим результатом, в більшості практичних випадків, є виконання вимог замовника і впровадження розробленого продукту. Сучасні автори [3-8] дуже часто результат оцінюваного ризику зводять до негативного типу ефекту, забуваючи, що навіть сам термін «ризик» означає

можливість або ймовірність настання подій з конкретними наслідками в результаті певних рішень або дій. Доцільність такого подання понять в теорії ризику особливо підкреслюється закономірностями, що виникають в інформаційних відношеннях при розробці програмного забезпечення, де складність і динаміка взаємозв'язків, нечіткість зовнішніх факторів, а також гетерогенність у структурній та функціональній побудові систем дозволяє розширити класифікацію результатів інформаційної діяльності.

Варто зауважити, що об'єктивний результат є наслідком ціленаправленого і явного виконання процесу, який пов'язаний з його суттю. Суб'єктивні результати проявляються у тих випадках, коли виконання процесу проходить з недостатнім рівнем визначеності і повноти інформації.

На практиці у сфері ІТ-індустрії, переважна кількість ризиків пов'язана саме з суб'єктивними результатами здійснення ходу або виконання процесу.

Таким чином, можна відмітити, що усі ризики при розробці програмного забезпечення, з більшим або меншим допущенням, можна вважати суб'єктивним результатом виконання процесу, який пов'язаний з нестачею кількісної або якісної інформації про процес, а також її невизначеністю. Зазначені фактори можна вважати головною причиною, яка породжує і супроводжує ризики у всьому їхньому життєвому циклі. Кожен ризик циклу розробки програмного забезпечення (ПЗ) можна пов'язати з одним із наступних компонентів: дані; людина; система. При цьому слід врахувати ступінь впливу і відповідальності результатів оцінки ризиків для різних методологій розробки програмного забезпечення.

Аналіз літератури [1-8] показав, що в даний час існує множина $R = \{x_1, \dots, x_n\}$ різних методик розроб-

ки ПЗ. Слід зауважити, що вибір безпосередньо методики при реалізації проекту має суттєвий вплив на результати аналізу, оцінки та управління ризиками. Відомо, що однією з широко використовуваних методологій розробки ПЗ є спіральна методологія - ця методологія керується інкрементними розробками на основі ризиків. Більше 15% тимчасових витрат управління ІТ-проектами йде на аналіз та оцінку ризиків. Аналіз літератури [3-8] показав, що сучасні автори в своїй більшості виділяють п'ять основних ризиків: помилки, властиві розкладу, поява нових вимог, зміна співробітників, декомпозиція специфікації, низька продуктивність.

Проведені дослідження показали, що дана позиція спірна, оскільки не враховує ряд важливих аспектів розробки ПЗ. Аналіз нормативної документації ряду відомих фірм-розробників ПЗ показав, що на етапі оцінки ризиків, як правило, не враховуються ризики, пов'язані з можливою наявністю помилок в моделях, алгоритмах, програмах обробки інформації, які використовуються для вироблення керуючих рішень, нехтуються ризики безпеки (можливих помилок, що впливають на вразливість ПЗ). Це часто призводить до помилок і, відповідно, необґрунтованих витрат (часових, економічних, іміджевих та ін.).

Таким чином, проведені дослідження показали, що, незважаючи на важливість вирішення завдання управління ризиками при розробці ПЗ, на даний момент немає чітко сформованої, стандартизованої методологічної бази опису даного процесу. В даний час спостерігається:

- відсутність єдиного, комплексного і системного підходу до проблеми виникнення ризиків при розробці ПЗ;
- відсутність ясності та прозорості у розумінні кінцевих результатів впливу ризиків, їх недостатнього врахування при розробці ПЗ;
- значні різництв у розумінні методик аналізу, оцінки та управління ризиками;
- недостатність урахування важливих факторів, що виникають з вдосконалення технологій і засобів розробки ПЗ.

Аналіз літератури [1-8] та проведені дослідження показали, що загальна послідовність оцінки ризиків найчастіше включає в себе наступні дії:

- виявлення джерел і причин ризику розробки ПЗ, етапів і робіт, при виконанні яких виникає ризик.
- ідентифікація всіх можливих ризиків, властивих розглядуваному проекту.
- документування результатів та їх подальша пріоритизація.
- оцінка рівня окремих ризиків і ризику проекту, що визначає його економічну доцільність.
- визначення допустимого рівня ризику розробки ПЗ.
- розробка заходів зі зниження ризику.

Відповідно до даного алгоритму, оцінка ризику підрозділяється на три взаємодоповнюючих напрямки: якісний (етапи 1-3) та кількісний аналіз (етапи 4, 5) ризиків розробки ПЗ, а також управління (етап 6).

Метою роботи є розробка комплексу методів якісного аналізу та кількісної оцінки ризиків розроб-

ки програмного забезпечення, який дозволить вирішити протиріччя, що виникає при розробці ПЗ.

Дослідимо більш докладно методики якісного та кількісного аналізу ризиків розробки ПЗ.

Результати досліджень

Проведені дослідження показали, що методика якісної оцінки ризиків проекту є описовою і являє собою процес, спрямований на виявлення конкретних ризиків проекту, а також причин, що їх породжують, з подальшою оцінкою можливих наслідків і вироблення заходів для роботи з ризиками. У процесі якісного аналізу ризиків відбувається вироблення метрик, що відповідають за визначення граничних показників факторів, які сигналізують про прояв ризику(-ів).

Розглядаючи перший пункт наведеного вище переліку дій щодо якісного та кількісного аналізу ризиків, зауважимо, що початкові дані для виявлення і опису характеристик ризиків можуть братися з різних джерел: база знань організації; інформація з відкритих джерел, наукових праць; маркетингова аналітика; опитування експертів та ін.

Ряд відомих авторів [1-8], провівши дослідження, виявили найбільш поширені ризики при розробці ПЗ. Наприклад, автори Демарко і Лістер [1] наводять свій список з п'яти найбільш важливих джерел ризиків будь-якого проекту розробки ПЗ: вади календарного планування; плинність кадрів; роздування вимог; порушення специфікацій; низька продуктивність. Можна відзначити, що даний перелік має узагальнений характер, що в значній мірі ускладнює метричну оцінку наведеного списку.

Баррі Бом в своїй роботі [2] розширює список до 10 найбільш поширених ризиків програмного проекту: дефіцит фахівців, нереалістичні терміни і бюджет, реалізація невідповідної функціональності, розробка неправильного користувальницького інтерфейсу, «золота сервіровка», перфекціонізм, непотрібна оптимізація і відточування деталей, безперервний потік змін, брак інформації про зовнішні компоненти, що визначають оточення системи або залучені в інтеграцію, недоліки в роботах, виконуваних зовнішніми (по відношенню до проекту) ресурсами, недостатня продуктивність одержуваної системи, «розрив» в кваліфікації фахівців різних галузей знань. Однак цей перелік не повний, і неструктурований. Це ускладнює процес оцінки взаємовпливу наведених ризиків один на одного.

Досить докладно ризики були оцінені і класифіковані в роботах [1-10]. Відповідно до даних досліджень ризики класифікуються за наступними ознаками: середовище (внутрішній, зовнішній ризики); природа (економічний, технічний, технологічний); сфера (ризик проекту, процесу, продукту); рівень (від критичного до незначного ризику); галузь впливу (ризик невиконання бюджету проекту, ризик невиконання плану проекту, ризик невиконання якості проекту); ланка управління ризиком (ризик окремого процесу, ризик проекту, ризик компанії). Однак подібна класифікація робить акцент на проектах розробки програмних систем, які не пов'язані з процесами їх подальшого впровадження та адаптації систем в умо-

вах конкретної організації, експлуатації в умовах можливих зовнішніх зловмисних впливів.

Використовуючи результати досліджень наведених вище авторів, думки експертів, маркетингові дані, а також бази знань відомих фірм представляється доцільним ідентифікувати ризики розробки ПЗ у вигляді сукупності множин:

- організаційних ризиків $Z = \{Id1, \dots, Id5\}$:
- Id 1* – невиконання стратегії розробки ПЗ;
- Id 2* – невідповідність організаційної структури;
- Id 3* – неадекватний вибір стратегії розробки ПЗ;
- Id 4* – низький рівень підтримки топ-менеджментом;
- Id 5* – культурні проблеми та проблеми оточення;
- управлінських ризиків $U = \{Id6, \dots, Id9\}$:
- Id 6* – неефективний менеджмент проектів;
- Id 7* – неадекватний менеджмент змін при розробці ПЗ;
- Id 8* – невикористання груп лідерів розробки ПЗ;
- Id 9* – недостатній супровід зі сторони менеджерів;
- операційних ризиків $Y = \{Id10, \dots, Id15\}$:
- Id 10* – неадекватний фінансовий менеджмент;
- Id 11* – неадекватне навчання та інструктування;
- Id 12* – неефективні комунікації;
- Id 13* – неефективний консультативний сервіс;
- Id 14* – нестабільність дій постачальників;
- Id 15* – неадекватний реінжиніринг бізнес-проектів;
- технологічних ризиків $T = \{Id16, \dots, Id20\}$:
- Id 16* – непередбачена технічна складність;
- Id 17* – неадекватне забезпечення системи розробки ПЗ технічними потужностями;
- Id 18* – неефективне обслуговування і переоснащення системи;
- Id 19* – неадекватний менеджмент існуючих систем;
- Id 20* – неадекватна взаємодія з іншими системами;
- експлуатаційних ризиків $E = \{Id21, \dots, Id24\}$:
- Id 21* – неадекватна складність інтерфейсів;
- Id 22* – недостатній експлуатаційний супровід ПЗ;
- Id 23* – неадекватний взаємовплив експлуатованого і впроваджуваного ПЗ;
- Id 24* – невиявлення вразливостей безпеки ПЗ;
- соціальних ризиків $C = \{Id25, \dots, Id27\}$:
- Id 25* – недостатня комунікація з користувачами;
- Id 26* – неефективний менеджмент при створенні груп розробників ПЗ;
- Id 27* – неефективна взаємодія між стейкхолдерами;
- правових ризиків $W = \{Id28, Id29\}$:
- Id 28* – зміна законодавства;
- Id 29* – неадекватність дій менеджменту органів державного управління.

Відмінною особливістю представленої класифікації є врахування експлуатаційних ризиків. Особливої важливості ці ризики набувають в умовах підвищеного рівня кіберзлочинності, коли нехтування вразливостями програмного забезпечення може призвести до експлуатаційних проблем, а часто і до неможливості експлуатації («краху») ПЗ. Крім цього, в умовах українського правового поля спостерігаються окремі випадки неадекватності і невідповідності правовим нормам дій посадових осіб державного апарату. Практика ряду відомих фірм-розробників ПЗ показує, що зазначений фактор ризику доцільно враховувати при розробці ПЗ, нарівні з фактором можливої зміни українського законодавства.

Вплив зазначених вище ризиків на основні фактори успіху розробки, впровадження та тривалості експлуатації ПЗ проілюстровано наступними залежностями. Провал при розробці ПЗ можливий при реалізації наступних ситуацій:

- провал при експлуатації ПЗ (включає в себе наступну групу ситуацій: невідтримка бізнес-процесів або нереалізація очікувань; недосягнення цілей; незадоволеність клієнтів/стейкхолдерів; погіршення іміджевого портрета клієнтів; погіршення показників інформаційної та функціональної безпеки) (через реалізацію ризиків: $\{Id 1, \dots, Id 5\}$, $\{Id 6, \dots, Id 9\}$, $\{Id 10\}$, $\{Id 12\}$, $\{Id 14, \dots, Id 20\}$, $\{Id 25, \dots, Id 29\}$).

- група ситуацій: перевищення бюджету, перевищення термінів, незавершення проекту (через реалізацію ризиків: $\{Id 1, \dots, Id 4\}$, $\{Id 6, \dots, Id 8\}$, $\{Id 11, \dots, Id 14\}$, $\{Id 16, \dots, Id 20\}$, $\{Id 21, \dots, Id 24\}$, $\{Id 25, \dots, Id 27\}$, $\{Id 29\}$)

Як видно з цих залежностей, більшість з розглянутих ризиків розробки ПЗ (організаційні, операційні, управлінські та ін.) можуть безпосередньо впливати як на процес розробки ПЗ, так і на процес його експлуатації. У той же час, наприклад, експлуатаційні ризики безпосереднього впливу на процес розробки ПЗ не мають. Але нехтування цими ризиками часто веде до провалу експлуатації ПЗ і втрати майбутніх замовлень і проектів (простоїв розробників ПЗ). Саме цим фактором викликаний зв'язок між блоками «Провал при експлуатації ПЗ» і «Провал при розробці ПЗ». Однак, незважаючи на це, в цілому можна виділити множину ризиків, що безпосередньо впливають на процес розробки ПЗ:

$$MR = \{Z, U, Y, C, T, W\},$$

і множину ризиків, що безпосередньо впливають на процес експлуатації ПЗ:

$$ME = \{Z, U, Y, C, T, W, E\}, (Id9, Id10, Id15, Id29 \notin ME).$$

Слід зауважити, що виділені вище фактори в достатній мірі описують перелік можливих ризиків розробки ПЗ. Однак вони не дають уявлення про взаємний вплив і, відповідно, можливу зміну кінцевого результату. Крім цього наведені множини ризиків розробки ПЗ в різному ступені впливають на кінцевий результат. Тому наступним кроком ідентифікації ризиків розробки ПЗ доцільно виконати процедури ранжування і виділення найбільш пріоритетних (важливих) ризиків розробки ПЗ. Проведені дослідження показали, що для вирішення задачі визначення взаємовпливу ризиків доцільно використовувати інструмент аналізу причинно-наслідкових зв'язків між різними факторами і ризиками, розроблений Каору Ісікава [11] (діаграма Ісікави). Відповідно до відомого принципу Парето [1], серед множини потенційних причин (причинних факторів, за Ісікавою), що породжують проблеми (наслідок), лише дві-три є найбільш значущими, їх пошук і повинен бути організований. Для цього здійснюється:

- збір і систематизація усіх причин, що впливають на досліджувану проблему;
- групування цих причин за смисловими і причинно-наслідковими блоками;

- їх ранжування всередині кожного блоку;
- аналіз отриманої картини.

Тому даний інструмент дозволяє прояснити і врахувати усі суттєві фактори, що впливають на результат розробки ПЗ.

Застосування діаграми Ісікави дозволяє з'ясувати причини будь-яких проблем в організації або, наприклад, причини виникнення експлуатаційних «багів» ПЗ. При цьому діаграма Ісікави має ряд переваг: допомагає наочно показати зв'язки між отриманим результатом і причинами, що його викликали; дозволяє провести аналіз ланцюжка факторів, що впливають на проблему.

Однак задачу вибору найбільш пріоритетних ризиків діаграма вирішити не може. Для вирішення цієї задачі в роботі пропонується використовувати математичний апарат багатокритеріальної оптимізації, що базується на локальній геометрії множини Парето.

Аналіз літератури [1-8] показав, що існують принаймні три формулювання багатокритеріальної оптимізації, що базується на локальній геометрії множини Парето:

- локальна. Знайти одне Парето-оптимальне рішення (найближче до заданої початкової точки).
- глобальна. Знайти кінцеву множину Парето-оптимальних рішень, які достатньо добре описують (покривають) істинний Парето-фронт.
- інтерактивна. Знайти Парето-оптимальне рішення, яке максимально задовольняє перевагам особи, що приймає рішення (ОПР).

Проведені дослідження показали, що в процесах, побудованих на принципах постійних комунікацій між учасниками, використання «мозкових штурмів» із залученням думок експертів, доцільним видається використання інтерактивного формулювання багатокритеріальної оптимізації.

У цих умовах абстрактну задачу вибору найбільш важливих ризиків розробки ПЗ з наявної початкової множини можливих (допустимих) варіантів (рішень) X можна сформулювати наступним чином.

Позначимо множину усіх заздалегідь визначених ризиків розробки ПЗ через $S(X)$. Вочевидь, $S(X) \in X$. Таким чином, в задачі вибору дано множину X , що містить принаймні два елемента, а вимагається знати деяку його не порожню множину $S(X)$. Припускається, що вибір проводиться ОПР, в ролі якого може виступати як окрема людина, так і цілий колектив розробників. Для того, щоб здійснюваний вибір найбільшою мірою відповідав досягненню наявної мети (тобто був «найкращим» або «оптимальним» для даної ОПР), необхідно в процесі вибору враховувати думку експертів. Проведені дослідження показали, що в даний час існує безліч підходів врахування думки експертів, проте всі вони мають істотні недоліки, головний з яких полягає в тому, що, не дивлячись на різноманіття і детальну вивченість ієрархій та «штучних» відношень, вкрай рідко будь-яке з них можна вважати задовольняючим певну ОПР в повній мірі. Характерним прикладом, що підтверджує даний факт є нехтування оцінкою вразливостей розробленого ПЗ (недостатність або повна відсутність репестування).

Тому для вирішення задачі вибору найбільш пріоритетних ризиків (звуження множини Парето) пропонується використовувати «кванти інформації». Для цього розглянемо довільні оцінки ризиків розробки ПЗ

$$y' = (y_1', \dots, y_m') \text{ і } y'' = (y_1'', \dots, y_m''), y',$$

що належать множині Парето-оптимальних векторів $f(P_f(X))$. За визначенням множини Парето повинні знайтися такі дві непустих підмножини номерів критеріїв $A, B \subset I = \{1, 2, \dots, m\}$, що

$$y_i' > y_i'', \quad y_i' - y_i'' = w_i > 0, \quad \forall i \in A, \quad (1)$$

$$y_j'' > y_j', \quad y_j'' - y_j' = w_j > 0, \quad \forall j \in B, \quad (2)$$

$$y_s'' = y_s', \quad \forall s \in I \setminus (A \cup B). \quad (3)$$

Згідно з умовами (1-3), перший вектор перевершує другий за компонентами групи критеріїв A , тоді як другий перевершує перший за компонентами групи критеріїв B . За іншими компонентами (якщо такі є) два зазначених вектора збігаються. Звуження множини Парето, тобто видалення деяких Парето-оптимальних векторів, зазвичай відбувається на основі порівняння. Людині найпростіше порівнювати пари. Якщо при порівнянні фіксованої пари Парето-оптимальних векторів y' і y'' виду (1-3) ОПР «вибирає» один із цих векторів (наприклад, другий), то це означає, що для неї перший вектор переважніший другого, тобто $y' \succ y''$, де \succ – відношення переваги, визначене на усьому критеріальному просторі \mathfrak{R}^m і, яке збігається на множині Y з відношенням \succ у.

Співвідношення $y' \succ y''$, задає «квант інформації» про відношення строгої переваги, який свідчить про готовність ОПР до компромісу – вона згодна піти на втрати за всіма критеріями групи B у розмірі w_j для того, щоб отримати прибавки у розмірі w_i за критеріями групи A , зберігши при цьому значення всіх інших критеріїв.

Наявність вказаного «кванта інформації» дозволяє скоротити множину Парето на один вектор y'' . Для того, щоб домогтися більшого скорочення можна прийняти, що $y' \succ y''$, має місце не тільки для даної пари векторів, але і для всіх тих векторів, які задовольняють умовам (1-3) за незмінних значеннях w_i і w_j . В цьому випадку запропоновано говорити, що група критеріїв A важливіша за групу B . При зазначеному розширенні дії «кванта інформації» можна розраховувати на більш помітне звуження множини Парето, хоча нерідко і воно виявляється недостатнім для остаточного вибору. У таких випадках має сенс накладати додаткові вимоги на відношення переваги так, щоб дія «кванта інформації» у звуженні множини Парето виявилася більш ефективною. Пізніше було встановлено, що вони представляють собою подальше посилення системи двох згаданих раніше аксіом, що гарантують виконання принципу Еджворта-Парето.

Аксіома 1 (аксіома виключення).

Аксіома 2. Відношення \succ визначено на усьому критеріальному просторі \mathfrak{R}^m і транзитивне на ньому.

Аксиома 3 (аксіома узгодження). Із двох векторів, що відрізняються один від одного єдиною компонентою, для ОПР переважніший вектор, що має більшу компоненту.

Аксиома 4 (аксіома інваріантності). Відношення переваги \succ інваріантне відносно лінійного позитивного перетворення (тобто є лінійним). Нехай один критерій (або група критеріїв) важливіший за інший критерій (іншої групи критеріїв), якщо має місце деяка умова Ξ , яка містить певну інформацію про відношення переваги ОПР. Звідси ясно, що без визначення важливості критеріїв завжди можна обійтися, оперуючи в процесі прийняття рішень безпосередньо з умовою Ξ . Щоб скористатися визначенням важливості, що базується на «кванті інформації» i , яке використовує в якості умови Ξ співвідношення (1-3), спочатку слід пояснити ОПР це визначення важливості, переконатися, що вона його «засвоїла», після чого для виявлення переваг ОПР задати їй питання «мовою важливості»: чи є група критеріїв A важливішою за групу B з параметрами w_i і w_j (для $i \in A$ і $j \in B$). Відомо, що бінарне відношення \succ , задане на векторному просторі \mathcal{R}^m , називається конусним, якщо існує такий конус $K \subset \mathcal{R}^m$, що співвідношення $y' \succ y''$, має місце тоді і тільки тоді, коли $y' - y'' \in K$.

Аксиома 5. Будь-яке бінарне відношення \succ , задане на векторному просторі \mathcal{R}^m , і яке задовольняє аксіомам 2-4, є конусним з гострим опуклим конусом (без початку координат), який містить всі вектори з невід'ємними компонентами. Зворотно, всяке конусне відношення \succ до зазначеного конусом, задовольняє аксіомам 2-4. Аксиома 5 відкриває можливість використання апарату опуклого аналізу і побудови змістовної математичної теорії для врахування різного набору «квантів інформації». Найбільш простий випадок одного «кванта» розглядається в наступному твердженні, доказ якого опирається на факти з теорії подвійності опуклого аналізу.

Аксиома 6. Нехай виконані аксіоми 2-4 і є «квант інформації» про відношення переваги \succ . Тоді для будь-якої множини вибраних варіантів $S(X)$, що задовольняє аксіомі 1, справедливі включення

$$S(X) \subset P_g(X) \subset P_f(X),$$

причому «новий» векторний критерій g може бути утворений з функцій f_i для всіх $i \in I \setminus B$:

$$g_{i,j} = w_j f_i + w_i f_j \quad \text{для всіх } i \in A, j \in B, \quad (4)$$

або із функцій f_i для всіх $i \in I \setminus B$:

$$f_0 = \min_{i \in A} (f_i / w_i) + \min_{j \in B} (f_j / w_j). \quad (5)$$

Важлива особливість аксіоми 6 полягає у відсутності будь-яких вимог до множини X і векторному критерію f : ці об'єкти можуть бути будь-якими. Обмеження накладаються лише на поведінку ОПР в процесі прийняття рішень та виражаються вони у формі аксіом 1-4.

Аксиомою 6 вказується оцінка зверху $P_g(X)$ для невідомої множини вибраних варіантів $S(X)$, більш точна, ніж множина Парето $P_f(X)$. Сама оцінка являє собою множину Парето-оптимальних варіантів, але відносно «нового» векторного критерію g .

Для того, щоб сформулювати g , зі «старого» векторного критерію f слід видалити всі компоненти групи критеріїв B і додати один нелінійний критерій f_0 виду (5), або $|A| \cdot |B|$ «нових» лінійних критеріїв виду (4), де $|L|$ позначає число елементів кінцевої множини L .

Варіант з нелінійної функцією f_0 виду (5) можна застосовувати для кількісних критеріїв, значення яких вимірюються шкалою відношень, тоді як варіант (4) допускає використання ще й в шкалі інтервалів. Нелінійну функцію f_0 виду (5) можна використовувати для вивчення випадку, коли одна група критеріїв важливіша за іншу, де, на відміну від наведеної вище аксіоматики, використовується операція транзитивного замикання бінарного відношення і деякі інші припущення.

Як показали дослідження, врахування декількох «квантів інформації» повинне в більшій мірі сприяти звуженню множини Парето. Однак, може трапитися ситуація, коли ряд «квантів інформації» матиме суперечливий зміст, і їх використання буде неможливим. Тому важливою є задача вибору несуперечливих «квантів інформації». В рамках роботи несуперечливою названо таку множину, яка «породжує» іррефлексивне відношення. Побудова оцінки зверху, для невідомої множини вибраних векторів

$$S(Y) = f(S(X))$$

у вигляді множини

$$\bar{P}(Y) = f(P_g(X))$$

за наявності довільного несуперечливого кінцевого набору «квантів інформації» у випадку кінцевої множини Y , зводиться до перевірки співвідношення

$$y' \succ_m y'' \quad (6)$$

для всіх пар допустимих векторних оцінок $y', y'' \in Y$, де \succ_m – бінарне відношення, яке будується на основі наявної несуперечливої множини «квантів інформації».

Таким чином отримала подальший розвиток методика структурної ідентифікації ризиків розробки ПЗ, що відрізняється від відомих побудовою оцінки ризиків розробки ПЗ «зверху» у вигляді множини за наявності довільного несуперечливого кінцевого набору «квантів інформації».

Використовуючи, наведену вище методику проведемо оцінку рангу ризиків розробки ПЗ. Після того, як ризики розробки ПЗ виявлені і включені до реєстру ризиків, виникає необхідність оцінки і визначення їх рангу окремо для кожної мети процесу/проекту (наприклад, для рамок функціональності, часу або інших ресурсів), і побудови матриці ймовірності і наслідків. Ранг ризику дозволяє оперативного управляти реагуванням на ризики, що розташовані в різних зонах матриці. Зони матриці грають роль пріоритетів.

Як було зазначено, на прийняття рішення про ранг ризику впливають пріоритети ОПП, сформовані багато в чому на основі експертних оцінок або результатів мозкового штурму (характерно для гнучких методик розробки ПЗ). З урахуванням цих факторів була побудована матриця якісної оцінки рангу ризиків розробки ПЗ відповідно до даних і експертних оцінок фахівців ряду відомих фірм-виробників ПЗ.

У табл. 1. наведені результати якісної оцінки рангу ризиків розробки ПЗ. Слід зауважити, що зони матриці грають роль пріоритетів. Наприклад, для ризиків, розташованих в зоні високого ризику (виділено темно-сірим кольором і складають множину D) матриці, необхідні попереджувальні операції і агресивна стратегія реагування. Для загроз, розташованих в зоні низького ризику (виділено білим кольором і складають множину G), здійснення запобіжних операцій може не знадобитися, якщо тримати під контролем весь зміст виконуваної діяльності. У свою чергу множина загроз середнього ризику (виділені світло-сірим кольором (множина F)) вимагають обов'язкової стратегії управління та реагування.

Таблиця 1. Результати якісної оцінки рангу ризиків розробки ПЗ

Якісна оцінка ймовірності заподіяння шкоди	Тяжкість наслідків при заподіянні шкоди				
	Дуже висока	Висока	Середня	Низька	Незначна
Висока	<i>Id 1</i>	<i>Id 6, Id 7, Id 24</i>	<i>Id 15</i>	<i>Id 23, Id 27</i>	<i>Id 25</i>
Середня	<i>Id 19</i>	<i>Id 3, Id 10, Id 16</i>	<i>Id 4, Id 8</i>	<i>Id 21</i>	<i>Id 22</i>
Низька	<i>Id 9</i>	<i>Id 2, Id 17</i>	<i>Id 12, Id 14</i>	<i>Id 18</i>	<i>Id 28</i>
Мала	<i>Id 26</i>	<i>Id 11</i>	<i>Id 20, Id 29</i>	<i>Id 13</i>	<i>Id 5,</i>

Як видно з табл. 1 основна частина організаційних, операційних, управлінських та експлуатаційних ризиків знаходиться в «зафарбованій» зоні. Це говорить про важливість врахування цих ризиків (особливо в сучасних умовах застосування гнучких методологій розробки ПЗ).

Слід зауважити, що багато ризиків (наприклад, *Id 18, Id 20*), на початку певної активності можуть перебувати в зоні низького рангу, а ближче до відповідальних віх переміститися в приграничні або більш критичні зони. У той же час ряд існуючих ризиків незалежно від початкового рівня рангу можуть переміститися в більш «критичну» область (наприклад, *Id 23, Id 24* та ін.).

Таким чином, запропонований апарат ідентифікації та якісної оцінки рангу ризиків розробки ПЗ дозволяє до 17% звзвити множину важливих ризиків і, відповідно, першочергових рішень управління.

Наступним етапом якісного аналізу ризику є процес документування.

Процес аналізу ризиків слід документувати протягом життєвого циклу всього проекту/процесу. Обсяг документування і його форма, що містить

результати аналізу, залежить від конкретних цілей проведеного аналізу ризику.

Аналіз документації відомих фірм розробників ПЗ показав, що в підсумковому документі доцільно фіксувати такі дані: титульний аркуш; список учасників процесу якісного аналізу ризиків розробки ПЗ; анотацію; зміст; цілі та завдання проведеного якісного аналізу ризиків розробки ПЗ; опис аналізованого об'єкта; методологію якісного аналізу ризиків розробки ПЗ – початкові припущення і обмеження, що визначають межі аналізу ризику; опис використовуваних методів аналізу і обґрунтування їх застосування; початкові дані та їх джерела; результати ідентифікації; результати якісного аналізу ризику; аналіз невизначеностей результатів оцінки ризику; рекомендації по роботі з ризиками; висновок; список використаних джерел інформації.

Таким чином, в результаті проведених досліджень на основі класифікації та структурної ідентифікації ризиків розробки ПЗ розроблено метод якісного аналізу ризиків розробки програмного забезпечення. Відмінною особливістю розробленого методу є врахування факторів експлуатаційних ризиків, особливо ризику невиявлення вразливостей ПЗ та оцінка довільного несуперечливого кінцевого набору «квантів інформації». Це дозволить до 17% звзвити множину важливих ризиків і знизити можливі фінансові та іміджеві втрати організації-розробників ПЗ.

Тільки після того, як накопичено досвід і необхідний масив даних, від якісного аналізу ризиків доцільно переходити до їх кількісної оцінки. Причому концентрувати увагу слід саме на тих ризиках, які в процесі якісної класифікації були включені в категорію високих (особливо з високим ступенем шкоди при високій ймовірності реалізації).

Як вказано вище, для ефективного управління проектами потрібно не тільки ідентифікувати ризики, але й оцінювати їх кількісно. При цьому особливості сучасних фірм-розробників ПЗ як надсистем, особливості окремих етапів розробки ПЗ, бізнес-процесів та їх груп як підсистем, визначають ряд проблем. До цих проблем можна віднести: відсутність статистичних даних про вдалі і невдалі проекти впровадження систем, особливо на операційному рівні; відсутність статистичних даних про провали безпеки при експлуатації ПЗ; унікальність кожного проекту впровадження; довгостроковість подібних проектів; високу вартість подібних проектів; значну складову несистемних факторів ризику, пов'язаних з внутрішніми факторами фірми-розробника ПЗ.

З огляду на наведені фактори можна відзначити, що для оцінки ризиків розробки ПЗ можна використовувати три основні підходи: формалізований опис невизначеності ризиків розробки ПЗ; корегування показників проекту шляхом заміни їх проектних значень на очікувані; перевірку стійкості.

Формалізована оцінка невизначеності, яка виникає в процесі реалізації проектів при відсутності статистичних даних, може спиратися на два методи: експертних оцінок і нечітких множин.

Проведені дослідження показали, що використання суб'єктивно-аксіологічної імовірності (експер-

тних оцінок) є вимушеним відступом науки перед нарощуванням несистемних факторів ризику розробки ПЗ, але це вимагає подальшої верифікації моделі та обчислених показників ризику. У зв'язку з цим доцільним видається перехід від суб'єктивних експертних методів до методів, які використовують теорію нечітких множин. Корегування показників проекту (процесу розробки ПЗ) шляхом заміни їх проектних значень на значення з урахуванням ризиків викликає додаткові складності, пов'язані з невідповідністю всіх факторів, що впливають на фінансові, іміджеві та інші здобутки і втрати.

Для подолання цих проблем можна використовувати методи, які спираються на опис бізнес-процесів і дозволяють виявляти зміни окремих їх параметрів, пов'язаних з розробкою, впровадженням та експлуатацією ПЗ.

Проведені дослідження показали, що адекватним інструментом для таких досліджень є «Аналіз дерева відмов» (*Fault Tree Analysis, FTA*), запропонований в роботах [9, 10, 12-15].

Аналіз даного підходу кількісної оцінки ризиків показав доцільність використання графічної моделі *FTA* в термінах математичної логіки. Це допоможе формалізувати умови впливу факторів ризику в різних їх комбінаціях на кінцеві показники проекту розробки ПЗ.

Наведемо приклад дерева ризиків розробки ПЗ. Групи ризиків формуються з урахуванням розробленої класифікації ризиків розробки ПЗ і результатів якісної оцінки рангу ризиків (табл. 1).

Крім того, для наочності оцінки груп ризиків, пропонується використовувати логічні елементи «*and*» і «*or*», які дозволяють використовувати методи математичної логіки для розрахунку коефіцієнтів груп ризиків і загального ризику. Очевидно, що для цієї схеми загальний коефіцієнт ризиків розробки ПЗ можна розрахувати за формулою:

$$P(Un\ 13) = P(Un\ 2) + P(Un\ 12) + P(Un\ 6) + P(Un\ 7) + P(Un\ 8) + P(Un\ 9) + P(Un\ 10) + P(Un\ 11), \quad (7)$$

де $P(Un\ 2) = P(Un\ 1) \cdot P(Id\ 2)$ – коефіцієнт ризику вибору неправильної методики розробки ПЗ;

$P(Un\ 1) = P(Id\ 1) \cdot P(Id\ 3)$ – коефіцієнт ризику вибору неправильної методики розробки ПЗ;

$P(Un\ 12) = P(Un\ 3) + P(Un\ 4) + P(Un\ 5)$ – коефіцієнт ризику неадекватного менеджменту проекту;

$P(Un\ 3) = P(Id\ 4) \cdot P(Id\ 9)$ – коефіцієнт ризику нехтування топ-менеджментом розробки ПЗ;

$P(Un\ 4) = P(Id\ 6) \cdot P(Id\ 7) \cdot P(Id\ 8)$ – коефіцієнт ризику неадекватного менеджменту активної стадії розробки ПЗ;

$P(Un\ 5) = P(Id\ 10) + P(Id\ 26)$ – коефіцієнт ризику неадекватного соціального менеджменту;

$P(Un\ 6) = P(Id\ 11) + P(Id\ 14) + P(Id\ 15)$ – коефіцієнт ризику невідповідності професійного рівня;

$P(Un\ 7) = P(Id\ 16) + P(Id\ 17) + P(Id\ 18) + P(Id\ 19) + P(Id\ 20)$ – коефіцієнт технологічних ризиків розробки ПЗ;

$P(Un\ 8) = P(Id\ 21) \cdot P(Id\ 22)$ – коефіцієнт ризику невідповідності складності ПЗ рівню підготовки експлуатанта;

$P(Un\ 9) = P(Id\ 23) + P(Id\ 24)$ – коефіцієнт ризику безпеки експлуатації ПЗ;

$P(Un\ 10) = P(Id\ 12) \cdot P(Id\ 25) \cdot P(Id\ 27)$ – коефіцієнт ризику неадекватної комунікації;

$P(Un\ 11) = P(Id\ 28) + P(Id\ 29)$ – коефіцієнт настання правових ризиків.

Наведемо значення коефіцієнтів для елементів дерева ризиків, що були отримані в результаті якісного аналізу ризиків розробки ПЗ: *Id 1* (0,08), *Id 2* (0,05), *Id 3* (0,06), *Id 4* (0,05), *Id 5* (0,01), *Id 6* (0,07), *Id 7* (0,07), *Id 8* (0,05), *Id 9* (0,06), *Id 10* (0,06), *Id 11* (0,04), *Id 12* (0,04), *Id 13* (0,02), *Id 14* (0,04), *Id 15* (0,6), *Id 16* (0,06), *Id 17* (0,05), *Id 18* (0,03), *Id 19* (0,07), *Id 20* (0,03), *Id 21* (0,04), *Id 22* (0,03), *Id 23* (0,05), *Id 24* (0,07), *Id 25* (0,04), *Id 26* (0,05), *Id 27* (0,05), *Id 28* (0,02), *Id 29* (0,03).

Використовуючи вираз 7 і наведені вище значення коефіцієнтів, можна визначити, що загальний коефіцієнт ризиків розробки ПЗ $P(Un\ 13) = 0,558$.

Слід зауважити, що нехтування ризиком невиявлення вразливостей безпеки ПЗ ($P(Id\ 24)$) може знизити точність кількісної оцінки ризиків розробки ПЗ до 13% ($P(Un\ 13) = 0,488$), а нехтування коефіцієнтом ризику безпеки експлуатації ПЗ ($P(Un\ 9)$) знизить точність оцінки до 22% ($P(Un\ 13) = 0,438$). Це підтверджує необхідність врахування ризиків невиявлення вразливостей безпеки ПЗ і неадекватного взаємодію експлуатованого та впроваджуваного ПЗ.

Ще однією особливістю проектів розробки ПЗ є їх довгостроковість і необхідність врахування інформації, яка виникає на чергових стадіях прийняття рішень. Для вирішення цієї задачі в [16], наприклад, пропонується, використовуючи модульність програмного забезпечення, оцінювати їх інвестиційну привабливість з урахуванням розроблених компонент. Проведені дослідження дозволили знайти такий підхід імовірнісної оцінки ризиків, який дозволив використовувати основні положення нечіткої множинної теорії при оцінці ключових показників результативності проекту. Можливість його використання оцінимо на прикладі показника вартості C_{NPV} (*Net Present Value*).

Аналіз ряду робіт, пов'язаних з економічною теорією ризиків показав, що для розрахунку показника вартості часто використовується класичний метод визначення чистої приведеної вартості проекту:

$$C_{NPV} = \sum_{i=1}^n \frac{D_i}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^i}, \quad (8)$$

де n – кількість періодів реалізації проекту; D_i – фінансовий потік доходів від проекту в період i ; C_i –

фінансовий потік витрат на проект в період i ; r – ставка дисконтування.

Однак з урахуванням того, що проект розробки ПЗ є довгостроковим і залежить від багатьох факторів, існує необхідність розглядати показники повернення інвестицій в ці проекти спільно з процесами розвитку проекту. Крім цього важливо враховувати фактори динамічної зміни ризикових компонентів в процесі проектування, кодування, тестування та експлуатації на всіх «витках спіралі» розробки ПЗ.

Проведені дослідження показали, що з урахуванням додаткових факторів ризику, а також (8) для розрахунку C_{NPV} доцільно використовувати вираз:

$$C_{NPV} = \sum_{i=1}^n \frac{(B - AC_i)}{(1+r)^i} - \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{\ell} C_i^{(k)} \right) / (1+r)^i - \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{\ell} e^{-\lambda \times Q C_i^{(k)}} \right) / (1+r_1)^i, \quad (9)$$

де B – фінансові інвестиції, що надходять в процесі розробки ПЗ в період i ; AC_i – поточні витрати на підтримку і розвиток системи розробки ПЗ в період i ; 1 – кількість додаткових видів витрат на придбання, налаштування і модернізацію технічної, технологічної, програмної та інших складових в процесі розробки ПЗ; $QC_i^{(k)}$ – витрати на врахування безпеки і тестування вразливості ПЗ; λ – параметр впливу факторів безпеки і тестування вразливості ПЗ на чисту приведену вартість проекту; $C_i^{(k)}$ – додаткові витрати в процесі розробки ПЗ.

Відмінною особливістю математичного виразу (9) є введення додаткових складових

$$\sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{\ell} C_i^{(k)} \right) / (1+r)^i; \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{\ell} e^{-\lambda \times Q C_i^{(k)}} \right) / (1+r_1)^i,$$

що характеризують врахування додаткових витрат на апаратну і програмну модернізацію фірми, удосконалення системи її управління, а також врахування безпеки і тестування вразливості ПЗ.

Оцінка ефективності проекту полягає в порівнянні C_{NPV} з деяким значенням $C_{NPVreference}$, яке визначає мінімально допустимий рівень приведеної вартості проекту розробки ПЗ.

З урахуванням невизначеності складових, на основі теорії нечітких множин можна розглядати трикутні нечіткі значення складових для вираження (9):

$$\overline{B}_i = \left(B_i^{(\min)}, \overline{B}_i, B_i^{(\max)} \right), \text{ якщо неможливо визначити}$$

фінансові доходи, які виникнуть від модифікації в процесі розробки ПЗ технологічних етапів;

$$\overline{AC}_i = \left(AC_i^{(\min)}, \overline{AC}_i, AC_i^{(\max)} \right), \text{ якщо існує невизначеність витрат, необхідних для підтримки і розвитку}$$

системи розробки ПЗ;

$$\overline{C}_i^{(k)} = \left(C_i^{(k)(\min)}, \overline{C}_i^{(k)}, C_i^{(k)(\max)} \right), \text{ якщо існує не-$$

визначеність щодо додаткових витрат k -го призначення.

Крім того, подібним же чином потрібно представити коефіцієнт дисконтування:

$$\overline{r}_i = \left(r_i^{(\min)}, \overline{r}_i, r_i^{(\max)} \right),$$

якщо інвестор не може оцінити вартість капіталу, який буде використовуватись в проекті.

Для приведення формули (9) до виду, який може використовуватися для обчислень, скористаємося сегментним способом, наведеним в роботі [17].

Якщо вибрати фіксований рівень приналежності нечітких чисел α (ординату функції приналежності нечітких чисел), то можна застосувати операції нечіткої арифметики, які дозволяють перетворити вираз (9) в систему рівнянь:

$$[C_{NPV1}, C_{NPV2}] = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \frac{(B_{i1} - AC_{i1})}{(1+r_1)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sum_{k=1}^{\ell} C_{i1}^{(k)} \right)}{(1+r_1)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sum_{k=1}^{\ell} e^{-\lambda \times C_{i3}^{(k)}} \right)}{(1+r_1)^i}, \\ \sum_{i=1}^n \frac{(B_{i2} - AC_{i2})}{(1+r_2)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sum_{k=1}^{\ell} C_{i2}^{(k)} \right)}{(1+r_2)^i} - \sum_{i=1}^n \frac{\left(\sum_{k=1}^{\ell} e^{-\lambda \times C_{i3}^{(k)}} \right)}{(1+r_1)^i}, \end{array} \right. \quad (10)$$

$$R_{NPV} = \left\{ \begin{array}{l} 0, \quad C_{NPV} < C_{NPV}^{(\min)}; \\ R \cdot \left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \ln(1-\alpha) \right) \\ \text{при } C_{NPV}^{(\min)} \leq C_{NPV} < C_{NPV}^{(av)}; \\ 1 - (1-R) \cdot \left(1 + \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \ln(1-\alpha) \right), \\ \text{при } C_{NPV}^{(av)} \leq C_{NPV} < C_{NPV}^{(\max)}; \\ 1, \quad C_{NPV} \geq C_{NPV}^{(\max)}, \end{array} \right. \quad (11)$$

$$\text{де } R = \left\{ \begin{array}{l} \frac{C_{NPV} - C_{NPV}^{(\min)}}{C_{NPV}^{(\max)} - C_{NPV}^{(\min)}}, \quad C_{NPV} < C_{NPV}^{(\max)}; \\ 1, \quad C_{NPV} \geq C_{NPV}^{(\max)}, \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{l} 0, \quad C_{NPV} < C_{NPV}^{(\min)}; \\ \frac{C_{NPV} - C_{NPV}^{(\min)}}{C_{NPV}^{(av)} - C_{NPV}^{(\min)}}, \quad C_{NPV}^{(\min)} \leq C_{NPV} < C_{NPV}^{(av)}; \\ \frac{C_{NPV}^{(\max)} - C_{NPV}}{C_{NPV}^{(\max)} - C_{NPV}^{(av)}}, \quad C_{NPV}^{(av)} \leq C_{NPV} < C_{NPV}^{(\max)}; \\ 1, \quad C_{NPV} \geq C_{NPV}^{(\max)}; \end{array} \right. \quad (13)$$

$$P_{NPV} =$$

$$= \begin{cases} \frac{\left(R_{NVP_{\min}}\right)^2}{\left(R_{NVP_{av}} - R_{NVP_{\min}}\right) \times \left(R_{NVP_{\max}} - R_{NVP_{\min}}\right)}, & \text{якщо } R_{NVP_{av}} > 0; \\ 1 - \frac{\left(R_{NVP_{\max}}\right)^2}{\left(R_{NVP_{\max}} - R_{NVP_{av}}\right) \times \left(R_{NVP_{\max}} - R_{NVP_{\min}}\right)}, & \text{якщо } R_{NVP_{av}} < 0. \end{cases} \quad (14)$$

$C_{NVP}^{(av)}$ – задає середній рівень нечіткого числа.

Дослідимо і проведемо оцінку ризиків розробки ПЗ за наступних умов: $n=3$; $B_1=15$; $B_2=16$; $B_3=17$; $r=(0,1; 0,125; 0,15)$; $AC_1=AC_2=AC_3=1$; $\ell=3$ (1 – витрати на придбання, налаштування та модернізацію програмного забезпечення в ході реалізації проекту, 2 – витрати на модернізацію апаратного забезпечення фірми та реорганізацію системи управління, яка необхідна після модернізації програмного забезпечення та устаткування, 3 – витрати на урахування безпеки ПЗ і додаткове тестування його вразливості); $C_{i1}=(1,1; 1,2; 1,3)$; $C_{i2}=(0,5; 0,6; 0,7)$; $C_{i3}=(0,1; 0,2; 0,3)$, $\lambda=1$, $C_{NVP_{\text{reference}}}=0$. Як показали проведені дослідження, ведення додаткових витрат в процесі розробки ПЗ до 1,5 разів підвищує чисту приведену вартість проекту. Результати розрахунку R_{NVP} для рівнів приналежності α від 0,1 до 1 з кроком 0,1 можуть бути представлені в нечіткій трикутній формі. Ризик проекту розробки ПЗ визначається ймовірністю попадання точки в область, обмежену графіком нечіткого числа при $R_{NVP} < 0$. Ця ймовірність визначається відношенням площі під цією частиною графіка до площі під всім графіком. Виходячи з цього, за допомогою формули визначимо рівень ризику для розглянутого прикладу проекту розробки ПЗ. Для приведеного прикладу проекту розробки ПЗ рівень ризику складе 0,713. Таким чином, запропонований в підпункті 3.2 загальний спосіб оцінки показника чистої приведеної вартості проекту розробки ПЗ є засобом подолання проблем, пов'язаних з неефективним завершенням проектів розробки ПЗ. Спосіб пропонує розглядати проект комплексно, з урахуванням необхідності врахування безпеки і тестування вразливості ПЗ, з використанням інструментів, які дозволяють подолати складність, невизначеність і довгостроковість проектів. Для подолання проблем відсутності статистичних даних і підвищення достовірності експертної оцінки пропонується використовувати методи теорії нечітких множин.

З огляду на всі описані вище етапи кількісної оцінки ризиків розробки ПЗ можна відзначити, що відмінною рисою розробленого методу є комплексне використання методики «Аналізу дерева відмов» і способу оцінки показника чистої приведеної вартості проекту розробки ПЗ з урахуванням негативних чинників можливого виявлення вразливостей безпеки ПЗ. Результати кількісної оцінки ризиків розробки ПЗ можуть бути використані в якості вхідних даних при управлінні ризиками безпосередньо на наступних етапах розробки ПЗ (прототипування, кодування, тестування і т.д.).

Висновки

В роботі визначено і вирішено одне з протиріч, що виникають при розробці ПЗ, яке полягає в нехтуванні фірмами-розробниками ПЗ факторів вразливості безпеки ПЗ. В якості вирішення зазначеної проблеми запропоновано використання розроблених методів якісного аналізу та кількісної оцінки ризиків розробки програмного забезпечення. В ході вирішення поставленої задачі на першому етапі розроблено метод якісного аналізу ризиків розробки програмного забезпечення. Його відмінною рисою є врахування факторів експлуатаційних ризиків, особливо ризику виявлення вразливостей ПЗ та оцінка довільного несуперечливого кінцевого набору «квантів інформації». Це дозволить до 17% знизити множину важливих ризиків і знизити можливі фінансові та іміджеві втрати організацій-розробників ПЗ. Однією з основних складових методу є методика структурної ідентифікації ризиків розробки ПЗ, що відрізняється від відомих побудовою оцінки ризиків розробки ПЗ «зверху» у вигляді множини за наявності довільного несуперечливого кінцевого набору «квантів інформації». На другому етапі розроблено метод кількісної оцінки ризиків розробки ПЗ. Його відмінною рисою є комплексне використання методики «Аналізу дерева відмов» і способу оцінки показника чистої приведеної вартості проекту розробки ПЗ з урахуванням негативних факторів можливого виявлення вразливостей безпеки ПЗ. Використання вдосконаленої методики «Аналізу дерева відмов» дозволить до 22% підвищити точність кількісної оцінки ризиків розробки ПЗ. У той же час використання способу оцінки показника чистої приведеної вартості проекту розробки ПЗ дозволяє розглядати проект комплексно, з урахуванням необхідності врахування безпеки і тестування вразливості ПЗ із залученням інструментів, які дозволяють подолати складність, невизначеність і довгостроковість проектів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tom DeMarco, Timothy Lister, Waltzing with Bears. Managing Risk on Software Projects. Dorset House Publ/, 2003. 542 p.
2. Boehm B.W., Egyed A. A. Spiral model of software development and enhancement. IEEE Computer. 1988. May. P. 61-72.
3. Sandra M. N., Sandra M.N., Carlos S. da S. Eduardo Risk management applied to software development projects in incubated technology-based companies: literature review, classification, and analysis. Gest. Prod., São Carlos. 2016, №23(4). P. 798-814.
4. Yet, B, Constantinou, A., Fenton, N., Neil, M., Luedeling, E., & Shepherd, K. A Bayesian Network Framework for Project Cost, Benefit and Risk Analysis with an Agricultural Development Case Study. Expert Systems with Applic. 2016. № 60. P. 141–155.
5. James J. J., Jamie Y. T. Chang, Houn-Gee Chen, Eric T. G. Wang, G. KleinJiang J. J. Achieving IT Program Goals with Integrative Conflict Management. Journal of Management Information Systems. 2014. № 31(1). P. 79-106.

6. Tavares B. G., C. Eduardo S. da Silva, A. D. de Souza. Risk Management in Scrum Projects: A Bibliometric Study. Journal of communications software and systems. 2017. № 13(1). P. 25-41.
7. Tomanek M., Juricek J. Project Risk Management Model Based on PRINCE2 and Scrum Frameworks/ M. Tomanek. The International Journal of Software Engineering & Applications (IJSEA). 2015. № 6(1). P. 81-88.
8. Power K. Impediment Impact Diagrams: Understanding the Impact of Impediments in Agile Teams and Organizations. Agile Conference (Orlando, Florida, 28 July - 1 August 2014,), Orlando, 2014. P. 18-32
9. Коваленко А.В., Смирнов А.А., Якименко Н.Н., Доренский А.П. Проблемы анализа и оценки рисков информационной деятельности. Збірник наукових праць "Системи обробки інформації". 2016. №3(140). С. 40-42.
10. Коваленко А.В., Смирнов А.А.. Использование псевдобулевых методов бивалентного программирования для управления рисками разработки программного обеспечения. Системы управління, навігації та зв'язку. 2016. №1 (37). С. 98-103.
11. Исикава К. Японские методы управления качеством/ под ред. А. В. Гличева. Москва: Экономика, 1988. 214 с.
12. Clifton A Ericson II Fault Tree Analysis Primer Create space Inc., Charlestone, NC. 2011. 136 p.
13. Guidelines and Methods for Conducting the Safety Assessment Process on Civil Airborne Systems and Equipment. 1996. 331 p.
14. Military Handbook "MIL-HDBK-338B" Electronic. Reliability Design Handbook. 1998. 1046 p.
15. Fault tree analysis (FTA). First edition. Geneve, 1990. 56 p.
16. Krishnan M. Soumya Software Development Risk Aspects and Success Frequency on Spiral and Agile Model. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 2015. № 3(1). P. 301-310.
17. Araszkievicz K. Building information modelling: an innovative way to manage risk in construction projects. International Journal of Contemporary Management. 2015. № 14(3). P. 23-40.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О. А. Смирнов,

Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький

Received (Надійшла) 28.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.05.2018

Методы качественного анализа и количественной оценки рисков разработки программного обеспечения

А. В. Коваленко

В работе определено и решено одно из противоречий, возникающих при разработке ПО, которое заключается в пренебрежении фирмами-разработчиками ПО факторов уязвимости безопасности ПО. Все риски при разработке программного обеспечения, с большим или меньшим допуском, можно считать субъективным результатом выполнения процесса, который связан с недостатком количественной или качественной информации о процессе, а также ее неопределенностью. Указанные факторы можно считать главной причиной, порождает и сопровождает риски во всем их жизненном цикле. В качестве решения данной проблемы предложено использование разработанных методов анализа и количественной оценки рисков разработки программного обеспечения. Его отличительной особенностью является учет факторов эксплуатационных рисков, особенно риска выявления уязвимостей ПО и оценки произвольного непротиворечивого конечного набора «квантов информации». Доказано, что методика качественной оценки рисков проекта является описательной и представляет собой процесс, направленный на выявление конкретных рисков проекта, а также причин, их порождающих, с последующей оценкой возможных последствий и выработке мер для работы с рисками. В процессе анализа рисков происходит выработка метрик, отвечающих за определение предельных показателей факторов, которые сигнализируют о проявлении рисков. Разработано метод количественной оценки рисков разработки ПО. Его отличительной особенностью является комплексное использование методики «Анализа дерева отказов» и способа оценки показателя чистой приведенной стоимости проекта разработки ПО с учетом негативных факторов возможного выявления уязвимостей безопасности ПО. В то же время использование метода оценки показателя чистой приведенной стоимости проекта разработки ПО позволяет рассматривать проект комплексно, с учетом необходимости учета безопасности и тестирования уязвимости ПО с привлечением инструментов, которые позволяют преодолеть сложность, неопределенность и долгосрочность проектов.

Ключевые слова: оценка рисков, разработка программного обеспечения.

Quality analysis and quantitative assessment of risks methods of software development

O. Kovalenko

In the article, one of the contradictions arising in the development of software is defined and solved, which consists in neglecting software developers of software vulnerability vulnerabilities. All risks in the development of software, with more or less admission, can be considered a subjective result of the process, which is associated with a lack of quantitative or qualitative information about the process, as well as its uncertainty. These factors can be considered the main reason, generates and accompanies risks throughout their life cycle. As a solution to this problem, the use of developed methods of analysis and quantitative assessment of the risks of software development is suggested. Its distinctive feature is the consideration of operational risk factors, especially the risk of identifying software vulnerabilities and evaluating an arbitrary, consistent, finite set of "information quanta". It is proved that the method of qualitative risk assessment of the project is descriptive and represents a process aimed at identifying specific project risks, as well as the causes that generate them, with subsequent assessment of possible consequences and development of measures to deal with risks. In the process of risk analysis, the development of metrics that are responsible for determining the limiting indicators of factors that signal the manifestation of risks. A method for quantifying software development risks has been developed. Its distinctive feature is the integrated use of the "Failure Tree Analysis" methodology and a method for estimating the net present value of a software development project taking into account the negative factors of possible detection of software security vulnerabilities. At the same time, the use of the method of estimating the net present value of the software development project allows the project to be considered in a comprehensive manner, taking into account the need to take into account security and vulnerability testing of the software with the use of tools that overcome the complexity, uncertainty and long-term nature of projects.

Keywords: risk assessment, software development.

И. В. Мирошниченко¹, М. В. Мирошниченко²

¹ ООО «Термо Техно Украина», Мариуполь, Украина

² Департамент социальной защиты населения Мариупольского горсовета, Мариуполь, Украина

РАСЧЕТ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РЕНТГЕНОФЛУОРЕСЦЕНТНОМ И ОПТИКО-ЭМИССИОННОМ АНАЛИЗЕ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ OXSAS КОРПОРАЦИИ THERMO FISHER SCIENTIFIC

Представлена методика расчета неопределенности измерения при определении концентраций химических элементов в образцах методами рентгенофлуоресцентного и оптико-эмиссионного анализа в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения OXSAS корпорации Thermo Fisher Scientific. Поскольку рентгенофлуоресцентный и оптико-эмиссионный методы анализа являются косвенными методами измерения, использующие полиномиальную зависимость между непосредственно измеряемым параметром (интенсивность) и тем, который выдается в качестве результата (концентрация), расчет базируется на вычислении доверительного интервала кривой корреляции сертифицированной концентрации и той, которая получена в результате расчета по калибровочным кривым.

Ключевые слова: неопределенность измерений, расширенная неопределенность, неопределенность измерений при рентгенофлуоресцентном анализе, неопределенность измерений при оптико-эмиссионном анализе, неопределенность измерений при калибровке, доверительный интервал, прослеживаемость измерений.

Введение

Постановка проблемы. Во всех сферах человеческой деятельности, использующих измерения, практическое значение имеет достоверность результата измерения [1]. Однако, ввиду того что невозможно произвести абсолютно точное измерение, остается открытым вопрос насколько результат измерения соответствует реальности, другими словами, возникает необходимость оценить неопределенность измерения.

Результат измерения вместе с указанием его неопределенности позволяет обоснованно сравнить его с другим результатом, независимо от метода определения, а также принять корректное и обоснованное решение о его приемлемости для исследователя и в целом применимости метода как такового для определения химического состава данного материала [2-5].

Анализ последних исследований и публикаций. основополагающим документом, дающим рекомендации по собственно расчету неопределенности и описывающим основные источники неопределенности является «Руководство по выражению неопределенности измерений» (Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)) [6]. Однако, к сожалению, «Руководство по выражению неопределенности измерений» предоставляет только лишь общие правила для анализа и расчета неопределенности измерения, не углубляясь в подробности и тем более не предоставляя пошаговой инструкции для оценки неопределенности специфичных методов измерения. В результате персонал лабораторий может столкнуться с трудностями при попытке расчета неопределенности измерения, применяя общие принципы к весьма специфичным методикам.

Программное обеспечение OXSAS корпорации Thermo Fisher Scientific позволяет полностью решить эту проблему благодаря встроенным алгоритмам расчета неопределенности в соответствии с документами [6-8].

Изложение основного материала

При измерении концентрации методами рентгенофлуоресцентного и оптико-эмиссионного анализа основными источниками неопределенности являются [9]: пробоотбор, условия транспортировки и хранения отобранных проб, пробоподготовка, стандартные образцы, калибровка прибора, предел обнаружения, дрейф прибора, ошибки оператора, случайные эффекты. Для большей наглядности удобно сгруппировать источники неопределенности по их вкладу в общий бюджет и сформировать диаграмму «причина-следствие», как показано на рис. 1.

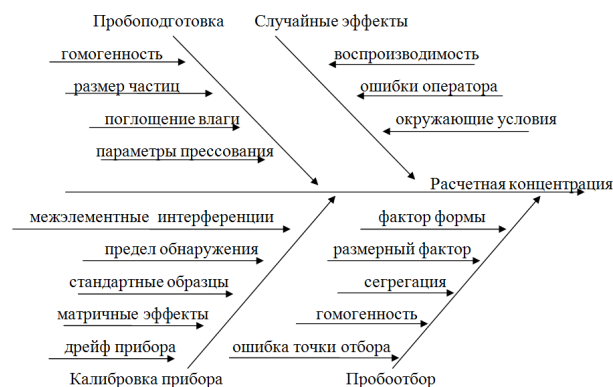


Рис 1. Источники неопределенности при рентгенофлуоресцентном и оптико-эмиссионном анализе

Рентгенофлуоресцентный и оптико-эмиссионный методы определения химического состава есть косвенные методы измерения. Непосредственно измеряемой величиной является количество полученных импульсов за определенный промежуток времени, регистрируемых системой детектирования, т.е. интенсивность излучения. Затем с помощью математической модели, учитывающей аппаратный дрейф прибора, предел обнаружения, фон, матричные эффекты, межэлементные влияния выполняется построение калибровочной кривой и интенсивности пересчитываются непосредственно в выходные ве-

личины — концентрации элементов. Неопределенность измерения выражается через определенный доверительный интервал соответствующей кривой зависимости. Доверительный интервал охватывает значения регрессионной функции с указанной пользователем доверительной вероятностью, а также, использует оценочную регрессионную функцию вместе с ассоциированной с ней стандартной ошибкой (Standard Error Estimate – SEE). Рассмотрим основные этапы оценки неопределенности. Калибровка базируется на уравнении измерения:

$$C = \left(\sum_{i=0}^{\max 3} A_i I^i + \sum_j^n a_j C_j \right) \cdot \left(1 + \sum_k^m m_k C_k \right), \quad (1)$$

где C – концентрация элемента; A_i – полиномиальные коэффициенты интенсивности; I – интенсивность, после применения всех этапов коррекций (коррекция дрейфа, коррекция наложений и фона, коррекция внутреннего стандарта, коррекция с помощью кривой отклика и базовой кривой); a_j – аддитивные коэффициенты коррекции интерферирующих элементов; C_j – концентрации интерферирующих элементов; m_k – мультипликативные коэффициенты коррекции интерферирующих элементов; C_k – концентрации интерферирующих элементов.

Все коэффициенты, входящие в уравнение измерения, рассчитываются встроенной в программное обеспечение OXSAS программой множественной регрессии MVR (Multi Variable Regression). Уравнение измерения редко представлено линейным уравнением без коррекций, например таковыми могут быть калибровочные кривые следовых концентраций элементов в чистых металлах. В большинстве же случаев, особенно при использовании оптико-эмиссионной спектрометрии, уравнение измерений при калибровке является нелинейным, и прямой расчет доверительного интервала является невозможным [10]. Однако, несмотря на достаточно сложную и нелинейную в общем случае калибровочную модель, существует линейное уравнение корреляции кривой калибровки:

$$C_{\text{calculated}} = a \cdot C_{\text{certified}} + b, \quad (2)$$

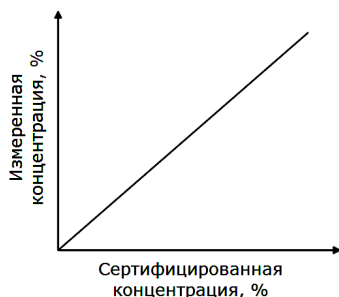


Рис 2. Уравнение корреляции кривой калибровки. Идеальная корреляция коэффициенты уравнения (2) принимают такие значения: $a = 1$, $b = 0$, а график корреляции представлен на рис. 2. Метод расчета неопределенности, применяемый в программном обеспечении OXSAS, базируется на использовании кривой корреляции.

Неопределенность калибровки рассчитывается через доверительный интервал кривой корреляции калибровки, описываемой уравнением (1). Полуширина доверительного интервала или другими словами предел возможного разброса значений относительно определенного уровня концентрации рассчитывается как функция концентрации, по методу наименьших квадратов в соответствии с уравнением:

$$CI(C)/2 = t_{1-\alpha; n-k} \cdot SEE \times \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + (C_I - \bar{C})^2 / \sum_{j=1}^n (C_{\text{certified},j} - \bar{C})^2}, \quad (3)$$

где $CI(C)$ – доверительный интервал при величине концентрации C ; m – число повторных измерений; n – число используемых для построения калибровочной кривой стандартных образцов; k – суммарное количество коэффициентов полинома и коррекций (дрейфа, фона, кривой отклика, интерференций, предела обнаружения); \bar{C} – среднее арифметическое концентраций $C_{\text{certified}}$; t – фактор Стьюдента для уровня значимости α ; C_I – концентрация, рассчитанная на основе измеренной интенсивности.

SEE – стандартная оценка ошибки (Standard Estimate of Error) (остаточная дисперсия уравнения регрессии). Стандартная оценка ошибки SEE фактически отображает качество построенной кривой:

$$SEE = \sqrt{\sum_{j=1}^n (C_{\text{certified}} - C_{\text{calculated}})^2 / (n - k)}, \quad (4)$$

где $C_{\text{certified}}$ – сертифицированная концентрация элемента; $C_{\text{calculated}}$ – рассчитанная концентрация элемента; n – число используемых для построения калибровочной кривой стандартных образцов; k – суммарное количество коэффициентов полинома и коррекций (дрейфа, фона, кривой отклика, интерференций, предела обнаружения); $n - k$ – число степеней свободы.

Для повышения качества калибровочной кривой и увеличения точности определения в области низких концентраций, целесообразно присваивать каждому калибровочному стандарту весовой коэффициент, в зависимости от величины его влияния на калибровочную кривую. Программное обеспечение OXSAS имеет встроенные алгоритмы расчета весовых коэффициентов, и опционально может осуществлять процесс их расчета и учета в автоматическом режиме. В случае, когда при построении калибровочной кривой стандартным образцам присваиваются весовые коэффициенты, уравнение расчета доверительного интервала приобретает следующий вид:

$$CI(C)/2 = t_{1-\alpha; n-k} \cdot SEE \times \sqrt{\frac{1}{\sum_{j=1}^n w_j} + (C_I - \bar{C})^2 / \sum_{j=1}^n w_j (C_{\text{certified},j} - \bar{C})^2}, \quad (5)$$

а средняя концентрация стандартных образцов рассчитывается по формуле:

$$\bar{C} = \sum_{j=1}^n w_j \cdot C_{\text{certified},j} / \sum_k^n w_k, \quad (6)$$

$w_{i,j,k}$ – весовые коэффициенты стандартных образцов.

Расчет неопределенности на основе кривой корреляции калибровки имеет большое преимущество, заключающееся в независимости процедуры расчета от выбранной математической модели пересчета измеренных интенсивностей излучения в концентрации химических элементов. Это достигается благодаря тому, что кривая корреляции, имеющая значение стандартной ошибки оценивания SEE, идентичное таковому у калибровочной кривой, в конечном итоге дает нам информацию насколько расчетные значения совпадают с сертифицированными значениями концентраций калибровочных стандартов.

Очевидно, что чем уже доверительный интервал, тем более прецизионным является результат измерения. Как видно из уравнений (3) и (5), доверительный интервал, а соответственно и неопределенность имеет минимальное значение при величине измеренной концентрации, равной, среднему значению сертифицированных концентраций стандартных образцов, использовавшихся для калибровки. Сам доверительный интервал имеет гиперболическую форму, и соответственно более высокую неопределенность вблизи границ калибровки. Эти обстоятельства имеют важные последствия.

Протяженность диапазона кривой влияет на неопределенность — слишком широкий диапазон, может давать неприемлемое значение неопределенности около краев. Поэтому иногда целесообразно использовать кривую, состоящую из нескольких сегментов, как показано на рис 3.

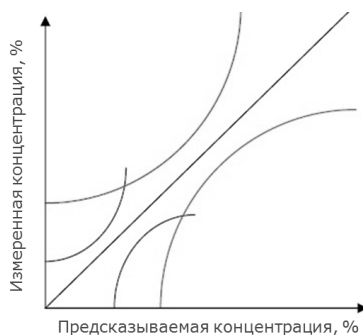


Рис 3. Влияние формы доверительного интервала и количества сегментов на величину неопределенности в каждой точке

Факторами, непосредственно, влияющими на ширину доверительного интервала являются коэффициент Стьюдента, определяемый желаемым уровнем доверительной вероятности (обычно выбирается значение в 95%), число стандартных образцов, величина стандартной ошибки SEE, а также количество измерений. Огромное значение имеет количество используемых для построения калибровки стандартных образцов, а также их качество. Наряду с сертифицированным значением концентраций химических элементов для стандартного образца также указывается соответствующее значение неопределенности. Приблизительно оценить величину неопределенности, вносимой стандартными образцами можно используя следующее уравнение [11]:

$$u(x_{pred}, x_i) = u(x_i) / n \quad (7)$$

где $u(x_{pred}, x_i)$ — величина неопределенности в рассчитываемом значении, вносимая i -м стандартным образцом; $u(x_i)$ — величина неопределенности i -го стандартного образца; n — число стандартных образцов, участвующих в калибровке. Тогда суммарная неопределенность вносимая стандартными образцами

$$u(RMs) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (u(x_{pred}, x_i))^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{u(x_i)}{n}\right)^2} \quad (8)$$

где $u(RMs)$ — величина неопределенности, вносимая стандартными образцами; $u(x_{pred}, x_i)$ — величина неопределенности в рассчитываемом значении, вносимая i -м стандартным образцом

Уравнение (8) может быть использовано для оценки вклада неопределенности калибровочных стандартов в общий бюджет неопределенности. В зависимости от величины этого вклада можно сделать вывод о целесообразности замены стандартных образцов на более качественные.

Следовательно, для достижения наивысшего качества калибровки необходимо подбирать образцы с минимально возможными значениями неопределенности, так как неопределенности, вносимые стандартными образцами увеличивает величину доверительного интервала. Таким образом, логика определения доверительного интервала, предусматривает построение корреляционной кривой, определение доверительного интервала регрессии, учет неопределенности калибровочных стандартов и в конечном итоге расчет доверительного интервала калибровки. Корреляция рассчитанных значений концентраций калибровочных стандартов и их сертифицированных значений показана на рис. 4.

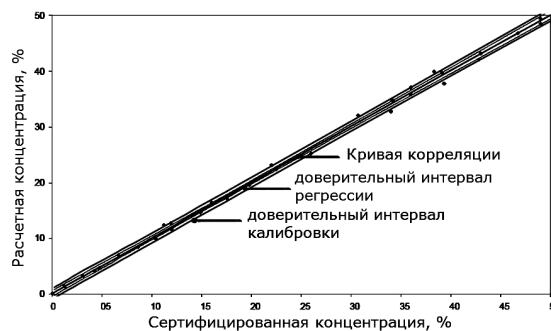


Рис 4. Кривая корреляции и ее доверительные интервалы

Для перехода от оценки неопределенности калибровки к оценке неопределенности непосредственно измерения выполняются преобразование изменения координат кривой корреляции, при этом доверительный интервал не изменяется (рис. 5).

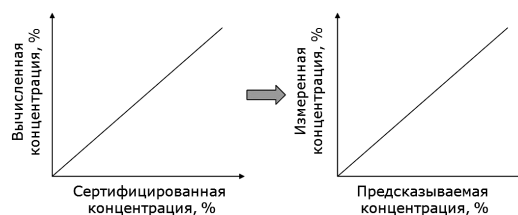


Рис 5. Преобразование координат для перехода от калибровки к измерению концентрации

Теперь величину доверительного интервала можно применить к результату измерения. Это происходит в следующей последовательности (рис. 6): измеряем концентрацию; учитываем значение доверительного интервала; получаем значение концентрации с учетом неопределенности калибровки.

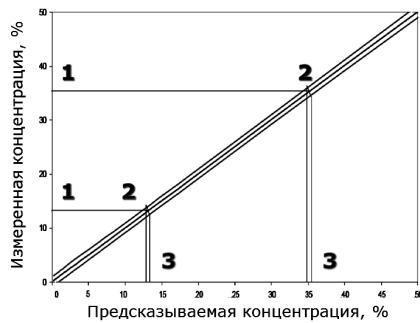


Рис 6. Использование доверительного интервала при оценке неопределенности измерения

Для выявления влияния случайных эффектов на конечный результат измерения рекомендуется проводить серию из нескольких измерений, т. е. для каждой пробы выполнять несколько прожигов. Таким образом вклад случайных эффектов в общий бюджет неопределенности становится возможным оценить по типу А, т.е на основе статистических данных. Оценкой стандартной неопределенности, вносимой случайными эффектами в программном обеспечении OXSAS служит величина *SD* (*standard deviation*), которая рассчитывается по формуле [11-13]:

$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{q=1}^n (x_q - \bar{x})^2}, \quad (9)$$

где u_A – стандартная неопределенность по типу А; n – число измерений; x_q – значение измеренной величины при q -м измерении; \bar{x} – среднее значение измеренной величины.

Для учета максимально возможного количества факторов, формирующих систематические ошибки, характерные для данной лаборатории (движения воздуха при взвешивании, вибрации при передвижении большегрузного транспорта, технологического оборудования, перепады температур, человеческий фактор и т.д.), рекомендуется проводить следующий порядок калибровки спектрометров. Инженером-методистом шифруется стандартный образец из числа тех, что использовались для калибровки специалистами калибровочной лаборатории и вводится в рутинный аналитический процесс, начиная со стадии первичной пробоподготовки (помол – для порошковых проб, шлифование и фрезерование – для монолитных образцов) и заканчивая измерением интенсивности аналитического сигнала. Далее специалист должен вложить результат данного измерения в график и учесть внесенную неопределенность измерений последующим перерасчетом калибровочной кривой. Совершая такую процедуру в каждую рабочую смену и на протяжении определенного времени (например, в течение месяца), можно учесть в бюджете неопределенности методики измерений множество факторов, формирующих систе-

матические ошибки, характерные для данной лаборатории. Последующая работа лаборатории должна быть направлена на повышение качества аналитических измерений, поиск и учет дополнительных возможных факторов, влияющих на неопределенность измерений, и общего сокращения бюджета неопределенности каждого из методов анализа через выявление и устранение систематических ошибок в том числе и через внешний контроль качества измерений путем межлабораторных сличений.

Теперь, когда оценен вклад наиболее существенных факторов в общий бюджет неопределенности, можно рассчитать суммарную стандартную неопределенность. Следует отметить, что неопределенность калибровки, выраженная через доверительный интервал и неопределенность, обусловленная случайными эффектами, выраженная через стандартное отклонение среднего *SD* не являются коррелированными величинами. Поэтому, суммарная стандартная неопределенность определяется в соответствии с GUM [6] как квадратный корень из суммы квадратов стандартных неопределенностей:

$$u = \sqrt{SD^2 + CI^2/4}, \quad (10)$$

где u – суммарная стандартная неопределенность; SD – стандартное отклонение среднего; CI – доверительный интервал.

Для расчета расширенной неопределенности в программном обеспечении OXSAS используется коэффициент охвата равный двум, что обеспечивает доверительную вероятность на уровне 95%. Расширенная неопределенность рассчитывается как

$$U = 2 \cdot u, \quad (11)$$

где U – расширенная неопределенность.

Результат измерения отображается таким образом, как представлено на рис. 7.

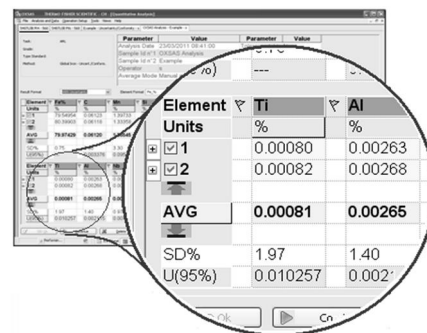


Рис 7. Отображение результатов измерения с указанием стандартного отклонения и неопределенности в ПО OXSAS

Выводы

Рассмотрены документы, устанавливающие правила расчета неопределенности. Выявлено недостаточность информации по расчету неопределенности специфичных методик измерения, таких как рентгенофлуоресцентный и оптико-эмиссионный анализ. Определены источники неопределенности при рентгенофлуоресцентном и оптико-эмиссионном методах анализа. Представлена детальная мето-

дика расчета неопределенности измерения при определении концентраций химических элементов в образцах методами рентгенофлуоресцентного и оптико-эмиссионного анализа в автоматическом режиме с использованием программного обеспечения OXSAS корпорации Thermo Fisher Scientific.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Menditto, A., Patriarca, M. and Magnusson, B. (2007), "Understanding the meaning of accuracy, trueness and precision", *Accreditation and Quality Assurance*, pp. 45-47, DOI: 10.1007/s00769-006-0191-z.
- Magnusson, B. and Örnemark, U. (2014), *Eurachem Guide: The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics*, ISBN 978-91-87461-59-0, 62 p., available at: https://www.eurachem.org/images/stories/Guides/pdf/MV_guide_2nd_ed_EN.pdf.
- ISO/IEC 17025:2005 *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*, ISO Geneva, available at: <https://www.iso.org/standard/39883.html>.
- ISO 9001:2008 *Quality management systems – Requirements*, ISO Geneva, available at: <https://www.iso.org/standard/46486.html>.
- ASTM E1601-12 *Standard practice for conducting an inter laboratory study to evaluate the performance of an analytical method*, 2012, available at: www.astm.org.
- JCGM 100:2008 *Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) (2008)*, 120 p., available at: https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf.
- EURACHEM / CITAC *Guide CG 4 Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement*. Second Edition (2012), 133 p., available at: http://www.citac.cc/QUAM2012_PI.pdf.
- Dietrich C. (1991), *Uncertainty, calibration and probability, second edition*, Adam-Hilger, Bristol, U.K., chapter 7.
- Magnusson, B., Näykki, T., Hovind, H. and Krysell M. (2012), *Handbook for calculation of measurement uncertainty in environmental laboratories*, Nordtest Report TR, 537 p.
- ISO/TS 28037:2010, *Determination and use of straight-line calibration functions*. ISO, Geneva (2010), available at: <https://www.iso.org/standard/44473.html>.
- Box, G.E.P., Hunter, W.G. and Hunter, J.S. (1978), *Statistics for experimenters*, New York, 664 p.
- Kragten, J. (1994), "Calculating standard deviations and confidence intervals with a universally applicable spreadsheet technique", *Analyst*, pp. 2161-2166.
- ISO 21748:2010. *Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation*. ISO, Geneva (2010), available at: <https://www.iso.org/standard/46373.html>.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І. П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків
Received (Надійшла) 28.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.05.2018

Розрахунок невизначеності вимірювань при рентгенофлуоресцентному та оптико-емісійному аналізі за допомогою програмного забезпечення OXSAS корпоратії Thermo Fisher Scientific

I. В. Мірошніченко, М. В. Мірошніченко

Представлена методика розрахунку невизначеності вимірювання при визначенні концентрацій хімічних елементів у зразках методами рентгенофлуоресцентного та оптико-емісійного аналізу в автоматичному режимі з використанням програмного забезпечення OXSAS корпоратії Thermo Fisher Scientific. Оскільки рентгенофлуоресцентний та оптико-емісійний методи аналізу є непрямими методами вимірювання, що використовують поліноміальну залежність між безпосередньо вимірюваним параметром (інтенсивність) та тим, що видається в якості результату (концентрація), розрахунок базується на обчисленні довірчого інтервалу кривої кореляції сертифікованої концентрації та той, що отримана розрахунком за допомогою калібрувальної кривої.

Ключові слова: невизначеність вимірювань, розширена невизначеність, невизначеність вимірювань при рентгенофлуоресцентному аналізі, невизначеність вимірювань при оптико-емісійному аналізі, невизначеність вимірювань при калібруванні, довірчий інтервал, простежуваність вимірювань.

Calculation of uncertainty of measurements of x-ray and optical emission analysis by OXSAS software assistance of Thermo Fisher Scientific corporation

I. Miroshnichenko, M. Miroshnichenko

The method for calculating of measurement uncertainty in determining the concentrations of chemical elements in samples methods of X-Ray fluorescence and Spark Optical-Emission analysis in automatic mode with using the software OXSAS of the Thermo Fisher Scientific corporation was fully presented. Since X-ray fluorescence and optical-emission methods of analysis chemical composition of substances are indirect measurement methods that use the polynomial dependence between the directly measurable parameter (intensities, given by instruments' detectors) and the one, that is expressed as a result (concentration of chemical elements in percents), the calculation is based on the calculation of the confidence interval of the correlation curve of the certified concentration and the ones, that are obtained by calculation via a calibration curve. Calculation of the uncertainty based on the calibration correlation curve has the great advantage, essence of which is that the calculation procedure is independent of the selected mathematical model for recalculating the measured radiation intensities in the concentration of chemical elements. This is achieved due to the fact that the correlation curve having the value of the standard estimation error (SEE) identical to SEE of the calibration curve and after all gives us information as far as the calculated values coincide with the certified values of the concentrations of the calibration standards. The contribution of random effects to the overall uncertainty budget is estimated by type A, i.e. on the basis of statistical data. An estimate of the standard uncertainty introduced by random effects in the OXSAS software is represented by the Standard Deviation of the mean (SD) value. The uncertainty of the calibration expressed through the confidence interval and the uncertainty due to the random effects expressed through the standard deviation of the mean are not correlated values. Therefore, the total standard uncertainty is determined according to GUM as the square root of the sum of squares. For calculation of expanded uncertainty, OXSAS software uses a coverage factor of two, which provides a confidence level of 95%.

Keywords: uncertainty of measurement, expanded uncertainty, uncertainty of XRF analysis, uncertainty of Spark Optical Emission analysis, uncertainty of calibration, confidence interval, traceability of measurements.

В. Я. Певнев, К. Н. Лейченко

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

АНАЛИЗ ВЕКТОРА АТАКИ ТЕХНОЛОГИИ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ BLUETOOTH

В статье проанализирован вектор атаки на устройства, использующие Bluetooth. Показано, что данная технология не обеспечивает надежность канала связи. **Цель статьи.** Исследование возможности проведения атаки на технологию беспроводной передачи данных Bluetooth, анализ полученных данных и составление рекомендаций. **Результаты.** В статье рассмотрены программные средства, позволяющие провести пентестинг беспроводной технологии передачи данных Bluetooth, рассмотрены и проанализированы уязвимости в рамках исследования Armis – пакет эксплоитов BlueBorne. Представлена проблема сложности закрытия уязвимости и выведены рекомендации, которые помогут снизить вероятность несанкционированного доступа, утечки данных и иные зловередные манипуляции, которые возможны при использовании уязвимостей в Bluetooth. **Вывод.** Анализ вектора атаки на Bluetooth отображает ненадежность данной технологии, что наводит на мысль о нецелесообразности использования данного канала беспроводной связи в системах, где важна конфиденциальность и целостность данных.

Ключевые слова: информационная безопасность, BlueBorne, Bluetooth, беспроводные сети.

Введение

Использование информационных технологий в начале XXI столетия обеспечило их внедрение во все сферы жизни человека. В наше время можно наблюдать большой рост популярности интернет вещей. «Умный дом» позиционирует себя как средство обеспечения удобства и расширение функций, казалось бы, обычных бытовых приборов. Множество датчиков в приборах вызывает необходимость создания внутреннего канала связи с сервером, который обрабатывал бы данные и выводил актуальную информацию для человека. Казалось бы, что нет минусов в том, что наш дом «поумнел». Но все же довольно весомый минус есть, и этот минус – обеспечение конфиденциальности во время сеанса связи.

Для удобства, создается беспроводная сеть на основе технологий Wi-Fi или Bluetooth. Wi-Fi – это тема для отдельного обсуждения, но стоит обратить внимание на Bluetooth.

В дистрибутивах kali и parrot предустановлено семь инструментов для пентестинга Bluetooth [1]:

- 1) Bluelog;
- 2) Blueranger;
- 3) Bluesnarfer;
- 4) Btscanner;
- 5) Crackle;
- 6) Redfng;
- 7) Spooftooth.

Также в 2017 году сразу несколько разработчиков обнаружили и выставили сразу несколько эксплоитов на такие операционные системы, такие как Android, Windows, iOS, Linux, которые направлены на эксплуатацию уязвимостей в Bluetooth. Все они вошли в пакет BlueBorne.

Данная уязвимость затрагивает более 8 миллиардов устройств по всему миру, и делает легкой мишенью всю сферу интернет вещей [2].

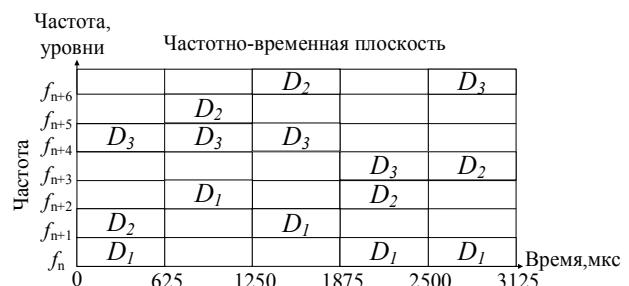
Цель данной статьи – исследовать вектор атаки Bluetooth и разобрать эксплоиты, которые входят в состав BlueBorne.

1. Принцип работы Bluetooth

В статье проанализирован вектор атаки на устройства, использующие Bluetooth. Показано, что данная технология не обеспечивает надежность канала связи. Технология Bluetooth состоит из 2 видов связи: синхронный SCO (Synchronous Connection Oriented) и асинхронный ACL (Asynchronous Connectionless). SCO используется для связи типа «point - point», скорость передачи равна 64 Кбит/с, ACL используется в рамках «point - multipoint», скорость передачи данных в виде пакетов составляет порядка 721 Кбит/с. Пакет состоит из:

- 72 бит вначале блока – код доступа;
- 54 бит – заголовок пакета, хранящий в себе информацию о параметрах и контрольную сумму;
- последующая область отведена для пересылаемой информации. Размер от 0 до 2745 бит [3].

Принцип строение систем Bluetooth опирается на использование метода расширения спектра при скачкообразном измерении частоты. Весь частотный диапазон, выделенный для Bluetooth радиосвязи разбит на N частотных каналов, с полосой 1МГц каждый. Также используется частотная манипуляция при кодировании пакетной информации. На рис. 1 изображена частотно-временная плоскость, отображающая одновременную работу трех Bluetooth модулей [3].



- D_1 - Устройство 1
 D_2 - Устройство 2
 D_3 - Устройство 3

Рис. 1. Частотно-временная плоскость

Как можно заметить, модули работают тактами по 625 мкс. Для каждого модуля назначается соответствующий канал в пределах каждого такта.

Пара любых соединенных устройств образуют пикосеть (рис. 2).

Пикосеть может содержать до 7 ведомых устройств, если в сети оказывается больше 8 устройств – создается следующая пикосеть и так далее [4].

Архитектура Bluetooth (рис. 3) состоит из следующих блоков [5]:

1) RF: преобразовывает битовые последовательности в радиосигналы;

2) Baseband: совершает управление физическими каналами, поверх которых устанавливаются соединения;

3) Link Manager: отвечает за установление, изменение и освобождение логических соединений;

4) L2CAP – высокоуровневый блок. Обеспечивает сегментацию и восстановление пакетных данных;

5) HCI – обрабатывает связь между хостом и модулем;

6) WAP, OBEX – интерфейсы для других протоколов связи;

7) TCS – поддерживает услуги телефонии.

8) SDP – позволяет обнаруживать службы другого Bluetooth устройства.

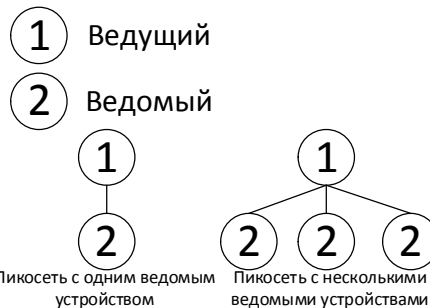


Рис. 2. Фундаментальная форма коммуникации в технологии Bluetooth

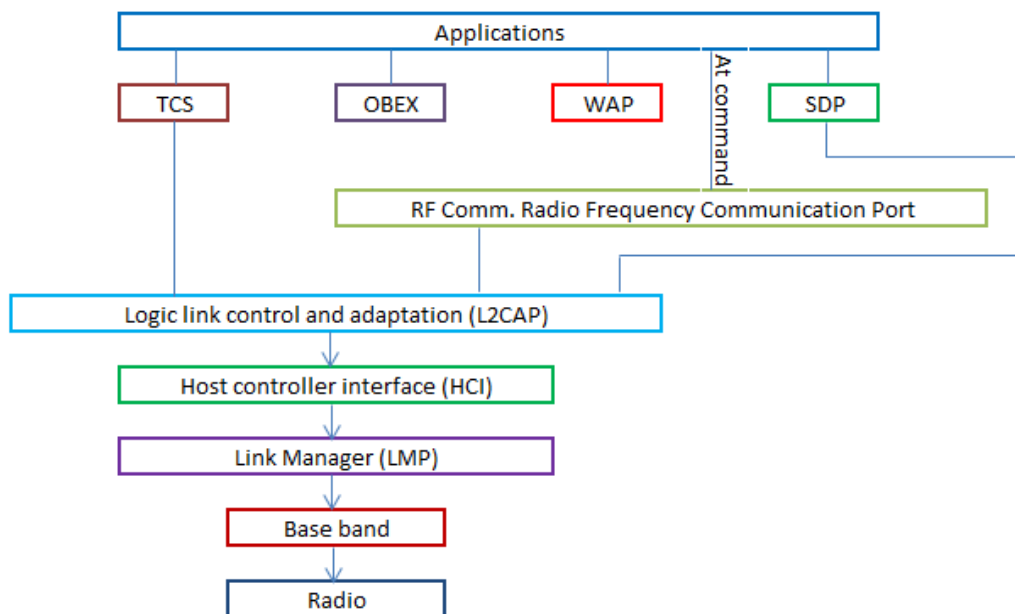


Рис. 3. Архитектура Bluetooth

2. Инструменты для пентестинга kali (parrot)

В дистрибутивах kali и parrot предустановлено 7 утилит для пентестинга Bluetooth:

1. Bluelog – это сканер Bluetooth, работающий на Linux, с опциональным режимом демона и веб-интерфейсом, он предназначен для исследований и мониторинга трафика. Предполагается, что он должен запускаться на длительные периоды времени в одном месте для определения, как много обнаруживаемых Bluetooth устройств в окрестности [6];

2. Blueranger – простой скрипт, написанный на Python, который использует i2sarp сигналы для обнаружения Bluetooth устройств и определения примерного расстояния до них [7];

3. Bluesnarfer – скрипт, который крадет данные с устройства [8];

4. Btscanner – этот инструмент, обладающий графическим интерфейсом, сканирует видимые устройства в пределах рабочего диапазона [9];

5. Crackle – используется для перехвата краткосрочного ключа, с помощью которого подбирает PIN сопряжения [10];

6. Redfngang – усовершенствованная версия, способная находить неподдающиеся обнаружению Bluetooth устройства [1];

7. Spooftooth предназначена для автоматической подмены (спуфинга) или клонирования имени, класса и адреса Bluetooth устройств. Клонирование этой информации позволяет Bluetooth устройству эффективно скрываться из вида. Программы по сканированию Bluetooth отобразят только одно устройство, если в диапазоне в режиме обнаружения доступны несколько устройств с одинаковой информацией (особенно это касается одинакового адреса) [11].

Особенности:

- клонирование и ведение записи информации об устройствах Bluetooth;
- генерация случайных Bluetooth профилей;
- изменение Bluetooth профиля каждые X секунд;
- можно установить информацию об устройстве для Bluetooth интерфейса;
- выбор из журнала сканирования устройства для клонирования.

3. Blueborne

Такое название имеют 8 опасных уязвимостей в реализации технологии Bluetooth. Особенность этих уязвимостей в том, что для их эксплуатации не требуется взаимодействие с целью, также не требуется сопряжение устройств.

Уязвимость покрывает почти все типы устройств на различных платформах.

BlueBorne совмещает в себе 8 критических уязвимостей на платформах [2]:

- Android:
 1. CVE-2017-0781;
 2. CVE-2017-0782;
 3. CVE-2017-0783;
 4. CVE-2017-0785.
- Linux:
 1. CVE-2017-1000251;
 2. CVE-2017-1000250.
- Windows:
 1. CVE-2017-8628.

Устройства iOS пока не получили своего CVE идентификатора.

Атака с использованием эксплоитов BlueBorne состоит из нескольких этапов.

В первую очередь необходимо обнаружить активные Bluetooth соединения вокруг. Примечательно, что даже выключенный режим «обнаружения» не защищает от идентификации устройства [13]. После необходимо получить MAC устройства, на который совершается атака. Определив тип операционной системы, производится настройка эксплоита и совершается атака на уязвимый протокол Bluetooth. После, в зависимости от целей, есть возможность «прослушивать» устройство, используя атаку «Человек посередине», или же вообще получить полный доступ к данным или удаленному управлению [13].

Перечень уязвимостей представлен ниже:

1. CVE-2017-0785 (Android уязвимость, может привести к утечке информации). Уязвимость существует в Service Discovery Protocol, (позволяет устройству идентифицировать другие Bluetooth девайсы). Позволяет отправлять запрос на сервер, заставляя раскрыть байт памяти, при этом получив ключи шифрования;

2. CVE-2017-0781 (Android уязвимость. Возможность выполнить код удаленно). Уязвимость существует Bluetooth Network Encapsulation Protocol (позволяет использовать устройство как модем для доступа в интернет). Недостаток позволяет вызвать нарушение целостности информации в памяти, что

позволяет выполнить удаленный код. Не требует взаимодействия с пользователем;

3. CVE-2017-0782 (Android уязвимость. Возможность выполнить код удаленно). Уязвимость существует в профиле персональной сети Bluetooth Network Encapsulation Protocol (отвечает за установление соединения между устройствами). При атаке происходит нарушение целостности информации в памяти, позволяет выполнить код удаленно;

4. CVE-2017-0783 (Android уязвимость. Man-in-The-Middle). Уязвимость существует в PAN-профиле стека Bluetooth. Позволяет использовать атаку «Человек посередине», создавая вредоносный сетевой интерфейс на целевом устройстве, а также перенастраивать IP маршрутизацию и принудительно передавать сообщения через этот интерфейс. Данная атака практически незаметна, т.к. не требует взаимодействия с пользователем;

5. CVE-2017-8628. (Windows уязвимость. Man-in-The-Middle). Идентична CVE-2017-0783, они используют одни и те же принципы в реализации некоторых протоколов Bluetooth;

6. CVE-2017-1000250 (Linux уязвимость. Утечка информации). Подобно CVE-2017-0785, уязвимость существует на сервере SDP (отвечает за автоматическое подключение устройств к службам, которые предоставляют другие устройства)

Позволяет раскрыть бит памяти, что приводит к утечке ключей шифрования;

7. CVE-2017-1000251 (Linux уязвимость. Переполнение стека в BlueZ). Уязвимость существует в стеке Bluetooth ядра Linux. Недостаток Logical link control and adaptation protocol вызывает повреждение памяти, позволяющий выполнить удаленный код;

8. Атака BlueBorne на iOS. Недостаток устранен в IOS10 и Apple TV выше 7.2.2. Уязвимость позволяет выполнить удаленный код с привилегиями;

9 Удаленное выполнение кода с помощью протокола Apple Low Energy Audio. Недостаток обнаружен в Low energy audio protocol, разработанном в Apple (Предназначен для передачи звука на периферию). Недостаток вызывает повреждение памяти, что позволяет получить контроль над устройством [14].

Заключение

В данной работе был проанализирован вектор атаки на устройства, использующие Bluetooth. Удалось продемонстрировать факт, что данная технология не является надежным каналом связи.

Существует множество решений для различных платформ для атаки по Bluetooth, и BlueBorne – только одна из них.

На практике был разобран и использован эксплоит под Android CVE-2017-0785, который позволяет получить бит памяти, что в свою очередь позволяет извлечь ключи шифрования для дальнейших атак, с кражей информации и получением удаленного доступа к устройству.

Стоит заметить, что функция скрывает обнаружения устройства не обезопасит от потенциального взлома.

Единственно верное решение защиты от несанкционированного доступа – отключение модуля Bluetooth или сокращение времени использования данной технологии до минимума, а также использование других каналов связи до появления патчей, которые устранили бы уязвимости.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Инструменты Kali Linux [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kali.tools/> [Время доступа: Март, 12, 2018].
2. Уязвимость Blueborne в протоколе Bluetooth затрагивает миллиарды устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/pentestit/blog/337780/> [Время доступа: Октябрь, 21, 2017].
3. Принцип работы Bluetooth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://1234g.ru/blog-of-wireless-technologies/bluetooth/chto-takoe-bluetooth-i-kak-on-rabotaet> [Время доступа: Апрель, 13, 2018]
4. Архитектура Bluetooth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iptcp.net/arkhitektura-bluetooth.html> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
5. Bluetooth – Introduction|Architecture|Applications [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.swiftutors.com/bluetooth-introduction.html> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
6. Инструменты Kali Linux – Bluelog [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kali.tools/?p=2470> [Время доступа: Март, 12, 2018]
7. Bluesnarfer [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tools.kali.org/wireless-attacks/bluesnarfer> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
8. BlueRanger [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tools.kali.org/wireless-attacks/blueranger> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
9. 9 Btscanner – cyborg linux [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cyborg.ztrela.com/btscanner.php/> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
10. Crackle [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://tools.kali.org/wireless-attacks/crackle> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
11. Инструменты Kali Linux – Spooftooth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kali.tools/?p=2479> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
12. Взлом Bluetooth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://codeby.net/kak-vzломat-bluetooth-chast-1-terminy-tehnologii-i-bezopasnost/> [Время доступа: Апрель, 18, 2018]
13. Kuchuk G., Kharchenko V., Kovalenko A., Ruchkov E. Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems. East-West Design & Test Symposium (EWDTS). 2016. Pp. 1-6. doi:<https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.
14. Хабрахабр – Уязвимость BlueBorne [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habrahabr.ru/company/cloud4y/blog/337782/> [Время доступа: Октябрь, 21, 2017]

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К. С. Козелкова,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 12.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

Аналіз вектора атаки технології безпроводної передачі даних Bluetooth

В. Я. Пєвнєв, К. М. Лєйченко

У статті проаналізовано вектор атаки на пристрої, що використовують Bluetooth. Показано, що дана технологія не забезпечує надійність каналу зв'язку. **Мета статті.** Дослідження можливості проведення атаки на технологію безпроводної передачі даних Bluetooth, аналіз отриманих даних і складання рекомендацій. **Результати.** У статті розглянуті програмні засоби, що дозволяють провести пентестінг безпроводної технології передачі даних Bluetooth, розглянуті і проаналізовані уразливості в рамках дослідження Armis - пакет експлоїтів BlueBorne. Представлена проблема складності закриття уразливості і виведені рекомендації, які допоможуть знизити ймовірність несанкціонованого доступу, витіку даних і інші шкідливі маніпуляції, які можливі при використанні вразливостей в Bluetooth. **Висновок.** Аналіз вектора атаки на Bluetooth відображає ненадійність даної технології, що наводить на думку про недоцільність використання даного каналу безпроводного зв'язку в системах, де важлива конфіденційність і цілісність даних.

Ключові слова: інформаційна безпека, BlueBorne, Bluetooth, безпроводні мережі.

Analysis of the vector of attacks of technology of wireless data transmission Bluetooth

V. Pevnev, K. Leychenko

The article analyzes the vector of attack on devices using Bluetooth. It is shown that this technology does not ensure the reliability of the communication channel. **Purpose of the article.** Investigation of the possibility of an attack on the technology of wireless Bluetooth data transmission, analysis of the data obtained and making recommendations. **Results.** The article considers software that allows conducting pentestification of Bluetooth wireless technology, examined and analyzed vulnerabilities in the Armis research - the BlueBorne exploit package. The problem of the complexity of closing the vulnerability is presented and recommendations are made that will help reduce the probability of unauthorized access, data leaks and other malicious manipulations that are possible with the use of vulnerabilities in Bluetooth. **Conclusion.** Analysis of the attack vector on Bluetooth shows the unreliability of this technology, which suggests that it is inappropriate to use this wireless channel in systems where confidentiality and data integrity is important.

Keywords: information security, BlueBorne, Bluetooth, wireless networks.

А. С. Свиридов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПІД ЧАС ВИКОРИСТАННЯ ПРОТОКОЛУ TCP FREEZE ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ ПРОПУСКНОЇ СПРОМОЖНОСТІ

У даній статті розглянуто протокол TCP, розглянуті його недоліки, а, зокрема, розриви TCP з'єднань. Розглянуто існуючі модифікації, які дозволяють усунути такі недоліки. Виявлено недоліки існуючих методів. Запропоновано метод управління передачею даних, в протоколі TCP Freeze, що дозволяє підвищити надійність передачі даних. Такий метод заснований на динамічній зміні, в залежності від умов, параметрів протоколу, які в своїй незмінній версії задаються статично. Висновки. Ефективність методу управління передачею даних, що використовується в протоколі TCP Freeze, може бути поліпшена в бездротовому гетерогенному середовищі за допомогою варіювання параметрів. Виявлено, що за умови рівності параметрів і їх значенні близькому до 20, пропускні спроможності протоколів TCP Freeze і TCP Reno будуть практично рівними. При більш низьких значеннях параметрів протокол TCP Reno показує кращу ефективність, ніж TCP Freeze, а при великих значеннях параметрів пропускна здатність протоколу TCP Freeze буде перевищувати таку у TCP Reno. Використання запропонованого методу дозволяє зменшити час передачі даних в мережі внаслідок реалізації алгоритму управління розміром плаваючого вікна протоколу, що згладжує флуктуації останнього і приводить до меншого числа повторних передач пакетів даних, а також обробку події хендовера.

Ключові слова: мережа, плаваюче вікно, TCP, протокол, TCP Freeze, передача пакетів, фази.

Вступ

Постановка задачі та аналіз літератури. Мобільні користувачі втрачають TCP-з'єднання, коли вони переміщуються або їх IP-адреси змінюються, або деякі вузли вздовж шляху маршрутизації зазнають невдачі. Крім того, мінливість якості бездротового середовища може привести до тимчасової втрати з'єднання, що призведе до завершення з'єднання TCP. Проблеми такого ж характеру зустрічаються і в кабельних мережах. Така поведінка мережі найчастіше для користувача буде досить незручною. Наприклад, після завантаження протягом 20 хвилин для користувача було би краще, щоб FTP-клієнт продовжував завантаження після тимчасового відключення, а не запуслав завантаження файлу спочатку. Іншим прикладом є випадок, коли користувачі роблять банківський переказ або виведення коштів, а лінія зв'язку переривається на кілька секунд, після чого користувачам необхідно виконувати всі дії спочатку. Таким чином, існує потреба підтримувати простими і ефективними способами роботу TCP з'єднань.

Головні недоліки роботи TCP-з'єднань. Першим недоліком є сталість TCP-з'єднання та причини його відключення. TCP-з'єднання переривається, якщо немає відповіді TCP keep-alive з іншого кінця в межах деякого порога. Тайм-аут Keep-alive – обов'язковий параметр, браузері, наприклад, Internet Explorer, часто встановлюють його на 1 секунду. Якщо відповіді не отримано протягом цього інтервалу з'єднання закривається. Ще одним недоліком є тайм-аут з'єднання. [1, 2] Як правило, цей коефіцієнт визначається розробником; немає деякого конкретного стандарту. Робота, пов'язана з проблемою постійного зв'язку, була представлена Юнгуан Чжан і Сон Дао [3]. Вони запропонували зіставити логічні та фізичні кінцеві точки з точки зору віртуальної адреси. Ця віртуальна адреса повинна складатися

з 3-х кортежів: дескриптор сокета, IP-адреса і номер порту TCP. Подібно концепції віртуальної адреси, був введений CID для однозначної ідентифікації з'єднання. CID може складатися з безлічі компонентів, таких як випадкове число, інформація про стан сокета, IP-адреса і номер порту TCP [4]. Інший спосіб – додати новий рівень поверх транспортного рівня, щоб приховати відключення безпосередньо з програми. Замість цього може бути вставлений спеціальний рівень під назвою Mobile Socket Layer [5].

Методи, описані вище, модифікують клієнт, або сервер, або обидва, для додавання додаткового рівня, який приховує відключення від TCP. Однак змінювати всі вузли недоцільно. Ще однією з ідей було введення концепції, яка перенаправляє весь трафік через додатковий проксі-сервер [6]. Цей проксі-сервер підтримує всі TCP-з'єднання для обох вузлів. Проксі-сервер може прозоро підключати з'єднання до альтернативних серверів, забезпечуючи при цьому узгодженість з'єднань.

Модифікація TCP Freeze, була вперше використана щоб запобігти перериванню локального TCP-сокета через збій з'єднання. Він також використовується в бездротових мережах з метою виявлення втрат і перевантаження [7, 8]. Метод TCP Freeze реалізований в стандартних реалізаціях TCP в тому сенсі, що, коли кінцевий хост-одержувач не має достатньої кількості вільного простору, він повідомляє що треба припинити відправку більшої кількості пакетів.

Основне призначення TCP Freeze – «заморозити» всі таймери TCP, коли вікно прийому заповнене. На сьогоднішній день не існує однозначного рішення, що дозволяє одночасно зі спільним використанням різних реалізацій транспортних протоколів в повному обсязі реалізувати потенціал пропускної здатності мережі.

У статті проводиться детальний аналіз приведених вище проблем і на його основі пропонується мо-

дифікація методу управління передачею даних, що використовується в протоколі TCP Freeze, що дозволяє у значній мірі більшість з них усунути. Ефективність запропонованої модифікації буде залежить від значень основних параметрів протоколу та від методів управління буферами, реалізованими в маршрутизаторах [9]. Крім методу управління перевантаженнями, що відрізняється від методу, реалізованого в інших модифікаціях протоколу TCP, дозволяє досягти більшої ефективності внаслідок меншої кількості повторних передач пакетів для більш коректної обробки події хендвера [10]. Протокол TCP Freeze реалізує метод, знижуючи вплив сполук з відносно більшої затримки поширення сигналу в з'єднанні.

Модифікацію протоколу TCP Freeze можна реалізувати, здійснивши декомпозицію методу управління передачею даних на різні фази функціонування, визначивши характер їх впливу на основні характеристики протоколу. Більш того, ефективність протоколу також залежить від дисципліни обслуговування череди маршрутизаторів, через які проходить встановлений маршрут. Таким чином, завжди існує незбійний компроміс між взаємною справедливістю та ефективністю використовуваних протоколів транспортного рівня, який залежить, зокрема, від використовуваних дисциплін управління чергами проміжних маршрутизаторів [11].

Таким чином, завдання створення та дослідження методів, що дозволяють протоколам транспортного рівня сучасних мереж досягати більшої пропускну здатності в різноманітних мережевих сценаріях, є **актуальним**.

Метою даної статті є розробка методу управління передачею даних для використання протоколом TCP Freeze з метою підвищення його пропускну здатності в сучасних мережах для підвищення надійності передачі.

Результати досліджень

В даний час існує цілий ряд протоколів, які керують передачею даних. Більшість з них є байт-орієнтованими протоколами з надійною доставкою даних і здійснюють доставку даних по маршруту з встановленням з'єднання. За останні роки були запропоновані різні модифікації, спрямовані на поліпшення протоколу TCP, однак вони переважно стосувалися фази відновлення втрат (протоколи TCP Tahoe, TCP Reno, TCP NewReno, M-TCP, I-TCP, Soop-TCP і TCP SACK) [12]. Значною мірою механізм управління передачею даних був змінений лише в протоколі TCP Freeze. Це досягнуто використанням оцінки доступного розміру смуги пропускання бездротового каналу, як ознаки перевантаження. Початок перевантаження визначається шляхом вимірювання різниці між поточним значенням часу передачі пакету даних в з'єднанні (T_n) і його мінімальним значенням, з подальшим коригуванням інтенсивності відправки пакетів в мережу (у відповідності зі значенням цієї різниці).

Реалізація механізму управління перевантаженнями протоколу TCP Freeze зводиться до послідовного виконання наступних кроків:

- 1) обчислення очікуваної (теоретично) швидкості відправки пакетів джерелом в мережу,
- 2) обчислення реальної швидкості відправки пакетів джерелом в мережу,
- 3) оцінка джерелом кількості пакетів, що знаходяться в черзі маршрутизатора, виконувана для кожного прийнятого пакета підтверджень,
- 4) обчислення чергового значення розміру плаваючого вікна на підставі різниці швидкостей, отриманої на попередньому кроці та значення розміру плаваючого вікна в попередній момент часу [13].

При близькості значень, очікуваної та реальної швидкостей джерела, з'єднання не може використовувати весь доступний розмір смуги пропускання каналу. Для збільшення коефіцієнта використання каналу необхідно збільшувати швидкість відправки даних джерелом. У разі, коли реальна швидкість значно нижче очікуваної, мережа стає перевантаженою та швидкість відправки даних джерелом потрібно знижувати. Після установки з'єднання, протокол TCP Freeze може перебувати в двох фазах: фазі повільного старту і в фазі запобігання перевантажень [14].

У фазі повільного старту, умовою входу в яку є успішне встановлення з'єднання, протокол TCP Freeze залишається до досягнення розміром плаваючого вікна деякого порогового значення γ (зазвичай рівного 1). Поки виконується умова $\Delta < \gamma$, відбувається додавання обсягу плаваючого вікна на один пакет за кожен другий інтервал часу передачі пакету. Отже, під час фази повільного старту, проводиться експоненціальне збільшення розміру плаваючого вікна протоколу TCP Freeze. Коли розмір плаваючого вікна W досягає порогового значення виходу з фази повільного старту, або починає дотримуватися умова $\Delta > \gamma$, протокол TCP Freeze увійде в фазу запобігання перевантажень. У фазі запобігання перевантажень протокол TCP Freeze функціонує на основі двох параметрів – α та β (зазвичай рівних значень 1 і 3, відповідно), змінюючи розмір плаваючого вікна у відповідності з виразом:

$$W(t) = \begin{cases} W(t-1) + 1, & \text{якщо } \Delta < \alpha; \\ W(t-1) - 1, & \text{якщо } \Delta > \beta; \\ W(t-1), & \text{в інших випадках,} \end{cases}$$

Втрата пакету може виявлятися внаслідок однієї з двох подій:

- закінчення часу таймера передачі пакета;
- послідовне отримання трьох однакових пакетів-підтверджень.

У першому випадку граничне значення для виходу з фази повільного старту встановлюється в значення половини значення поточного розміру плаваючого вікна, а розмір плаваючого вікна – в 1 пакет (або 2 пакети в деяких реалізаціях) та потім протокол TCP Freeze знову входить у фазу повільного старту. У іншому випадку джерело виконує швидку повторну передачу та швидке відновлення. Фактично, протокол TCP Freeze реалізує покращений механізм швидкої повторної передачі, заснований на більш точному внутрішньому таймері прото-

колу. Після виходу з фази, протокол TCP Freeze встановлює значення розміру свого плаваючого вікна в $3/4$ його поточного значення і знову входить в фазу запобігання перевантажень.

У гетерогенних мережевих сценаріях втрати пакетів можуть відбуватися при перевищенні сумарної кількості трафіку (як переданого, так і службового) ємності сполуки (C), що є критичною ділянкою на встановленому маршруті. Відсутності втрат, за такої умови буде виглядати таким чином:

$$\frac{W(t)}{T_{oc}(t)} + \frac{W_1(t)}{T_{oc}(t)} \cdot C,$$

тобто у стаціонарній точці

$$W(t) = T_{oc}(t) \cdot C - K/\sqrt{p(t)}.$$

Таким чином, обчислення розмірів плаваючого вікна для TCP Freeze гетерогенного мережного середовища буде виглядати таким чином.

$$W(t) = \ell(t) + T_p \cdot C - K/\sqrt{p(t)} + 1$$

У методі управління передачею даних, який використовується в протоколі TCP Freeze, величини α та β є константами. Завданням є таке управління розміром плаваючого вікна, при якому число пакетів, що знаходяться в буферній пам'яті вузлів на встановленому маршруті з'єднання, буде знаходитися в інтервалі між значеннями α та β . Керуючись таким принципом, в запропонованому методі реалізовано динамічна зміна значень параметрів α та β . Методи, що використовуються в фазі повільного старту та відновлення від перевантажень, залишаються незмінними (аналогічними оригінальним протоколом TCP Freeze), а змінам піддається тільки метод, який використовується в фазі запобігання перевантажень.

Протокол TCP Freeze виробляє обчислення дійсної швидкості кожен раз при успішній передачі плаваючого вікна. Функціонування запропонованого алгоритму, можна описати наступним чином. Відразу після встановлення з'єднання параметрам α та β присвоюються деякі початкові значення, α_0 та β_0 . Після успішної передачі кожного плаваючого вікна даних, проводиться динамічна зміна значень α та β на одиницю, відповідно до таких умов:

– якщо $T_n(t) > T_n(t-1)$ и $W(t) \leq W(t-1)$, то проводиться інкрементування значень α та β ;

– якщо $T_n(t) \leq T_n(t-1)$ и $W(t) > W(t-1)$, то проводиться декрементування значень α та β .

У разі виникнення втрат пакетів, значенням параметрів присвоюються їх початкові значення, після чого виконання алгоритму починається знов.

Для перевірки роботи методу була порівняна робота звичайного TCP Freeze, з конкурентоспроможним TCP Reno, та їх взаємодія. Моделювання протоколів TCP Freeze та TCP Reno в гетерогенному мережному середовищі показало, що протокол TCP Reno здатний досягати приблизно на 45% більше пропускної здатності, ніж TCP Freeze. Протокол TCP Freeze проявляє кращу пропорційність при роз-

поділі вільних ресурсів мережі, ніж TCP Reno, в однорідних мережних середовищах, але поводить себе набагато гірше ніж TCP Reno в гетерогенних.

Запропонований метод дозволяє дістатися динаміки протоколу TCP Freeze, порівнянної з такою для TCP Reno, в разі гетерогенного мережного середовища, в той же час зберігаючи її незмінною в разі гомогенного мережного середовища.

Даний метод також має ряд таких переваг:

– модифікації виробляються тільки в алгоритмі джерела, що не тягне за собою змін в структурі й інших елементах мережі;

– не проводиться додавання нових змінних в алгоритм, отже, не виникає потреби їх коректного завдання, оскільки запропонований алгоритм адаптивний до стану ділянки мережі, через яку встановлено маршрут з'єднання;

– результат роботи запропонованого модифікованого алгоритму управління передачею даних практично не відрізняється від оригінального, реалізованого в протоколі TCP Freeze, в разі бездротового гомогенного мережного середовища.

Висновки

Таким чином, в статті запропоновано метод управління передачею даних, призначений для використання в протоколі транспортного рівня бездротових мереж TCP Freeze.

Ефективність методу управління передачею даних, що використовується в протоколі TCP Freeze, може бути поліпшена в бездротовому гетерогенному середовищі за допомогою варіювання параметрів α та β . Виявлено, що за умов рівності параметрів і їх значенні близькому до 20 (значення вираховане з процесу моделювання), пропускні спроможності протоколів TCP Freeze і TCP Reno будуть практично рівними. При більш низьких значеннях параметрів α та β , протокол TCP Reno показує кращу ефективність, ніж TCP Freeze, а при великих значеннях параметрів α та β пропускна здатність протоколу TCP Freeze буде перевищувати таку у TCP Reno. Однак, у розмірах плаваючих вікон обох сполук протоколом TCP Freeze спостерігаються варіації, які обумовлені рівністю значень параметрів α та β . При збільшенні значень параметрів α та β збільшуються варіації значень розміру плаваючого вікна, що негативно впливає на загальну ефективність протоколу. Зокрема, простежується закономірність збільшення варіацій значень розміру плаваючого вікна при збільшенні параметра β . Збільшення параметра α при невеликих значеннях β практично не впливає на величину розкиду.

Використання методу дозволяє зменшити час передачі даних в мережі внаслідок реалізації алгоритму управління розміром плаваючого вікна протоколу, що згладжує флуктуації останнього і приводить до зменшення повторних передач пакетів даних, а також обробку події хендовера. **Напрямок подальших досліджень** – вирішення задачі оптимальності вибору початкових параметрів протоколу TCP Freeze.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Таненбаум Э. Компьютерные сети. 4-е изд. [Текст] / Э. Таненбаум // СПб.: Питер, 2003. – 992 с.
2. Телекоммуникационные системы и сети: Учебн. пос. В 3-х т. Т. 3. Мультисервисные сети / В.В. Величко, Е.А. Субботин, В.П. Шувалов, А.Ф. Ярославцев, под ред. В.П. Шувалова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 592 с.
3. Y. Zhang and S. Dao, "A Persistent Connection Model for Mobile and Distributed Systems," in Proc. Int. Conf. on Computer Communications and Networks., 1995, p. 300.
4. Кучук Г.А. Управление ресурсами инфокоммуникаций [Текст] / Г.А. Кучук, Р.П. Гахов, А.А. Пашнев.
5. Manner J. Mobility Related Terminology [Текст] / J. Manner, M. Kojo. – Network Working Group, RFC 3753. 2004
6. Гладун, А. Я. Аналіз моделей процедур хендвера в бездротових мережах, базованих на технології ATM / А. Я. Гладун, О. І. Проценко // Наукові записки НаУКМА. – 2003. – Т. 21: Комп'ютерні науки. – С. 85–93.
7. Кучук Г.А. Метод прогнозування фрактального трафіка / Г.А. Кучук, О.О. Можасв, О.В. Воробйов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 6 (18). – С. 181-188.
8. Кучук, Г.А. Модель процесса эволюции топологической структуры компьютерной сети системы управления объектом критического применения / Г.А. Кучук, А.А. Коваленко, А.А. Янковский // Системы обработки информации: сборник научных трудов. – Х.: ХУ ВС, 2014. – Вып. 7 (123). – С. 93 – 96.
9. Bakre, A. I-TCP: Indirect TCP for mobile hosts [Текст] / A. Bakre, B. Badrinath // Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS), May 30 – June 2, 1995, Canada. – Vancouver, 1995. – P. 136–143.
10. R. Ekwall, P. Urban, and A. Schiper, "Robust TCP Connections for Fault Tolerant Computing," in Proc. Int. Conf. on Parallel and Distributed Systems., 2003, pp. 501-508.
11. W-E. Eddy and J. Ishac, "Location Management in a Transport Layer , Mobility Architecture," NASA/TM-2005-213844., Aug. 2005.
12. Kuchuk, G., Kharchenko, V., Kovalenko, A. and Ruchkov, E. (2016), "Approaches to Selection of Combinatorial Algorithm for Optimization in Network Traffic Control of Safety-Critical Systems", Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS'2016), P. 384–389.
13. D. Funato, K. Yasuda, and H. Tokuda, "TCP-R: TCP mobility support for continuous operation," in Proc. IEEE Int. Conf. on Network Protocols., 1997, pp. 229-236.
14. D-A. Maltz and P. Bhagwat, "MSOCKS: An Architecture for Transport Layer Mobility," in Proc. IEEE Conf. on Computer Communications., 1998, vol. 3, pp. 1037-1045.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М. А. Павленко,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 22.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

Метод повышения надежности передачи данных при использовании протокола TCP Freeze путем повышения пропускной способности

А.С. Свиридов

В статье рассмотрен протокол TCP, рассмотрены его недостатки, а в частности, разрывы TCP соединений. Рассмотрены существующие модификации, которые позволяют убрать такие недостатки. Выявлена недостатки существующих методов. Предложен метод управления передачей данных, в протоколе TCP Freeze, что позволяет повысить надежность передачи данных. Такой метод основан на динамическом изменении, в зависимости от условий, параметров протокола, которые в его исходной версии задаются статически. Выводы. Эффективность метода управления передачей данных, используемый в протоколе TCP Freeze, может быть улучшена в беспроводном гетерогенной среде с помощью варьирования параметров. Выявлено, что при условии равенства параметров и их значения близком к 20 пропускные способности протоколов TCP Freeze и TCP Reno будут практически равны. При более низких значениях параметров протокол TCP Reno показывает лучшую эффективность, чем TCP Freeze, а при больших значениях параметров пропускная способность протокола TCP Freeze будет превышать таковую в TCP Reno. Использование предложенного метода позволяет уменьшить время передачи данных в сети вследствие реализации алгоритма управления размером плавающего окна протокола, сглаживает флуктуации последнего и приводит к меньшему числу повторных передач пакетов данных, а также обработку события хендвера.

Ключевые слова: сеть, плавающее окно, TCP, протокол, TCP Freeze, передача пакетов, фазы.

Method of growth of data transmission reliability time of use of TCP Freeze protocol by increase transmission capacity

A.S. Svyrydov

This article discusses the TCP protocol, its shortcomings are examined, and in particular the TCP connections breaks. Existing modifications that allow to remove such shortcomings are considered. The nonoptimality of existing methods is revealed. The method of data transmission control is proposed in the TCP Freeze protocol, which allows to increase the data transmission time. This method is based on dynamic change, depending on the conditions, protocol parameters, which are statically assigned in its original version. Conclusions The efficiency of the data transfer control method used in the TCP Freeze protocol can be improved in a wireless heterogeneous environment by varying the parameters. It was found that if the parameters and their values are equal to the nearest 20, the TCP Freeze and TCP Reno bandwidths will be practically equal. At lower values of parameters TCP Reno shows better performance than TCP Freeze, and at high values of parameters the TCP Freeze bandwidth will exceed TCP Reno's. The use of the proposed method allows to reduce the time of data transmission in the network due to implementation of the algorithm for controlling the size of the floating window of the protocol, which smooths the fluctuations of the latter and leads to a smaller number of retransmissions of data packets, as well as handling the event handover.

Keywords: network, floating window, TCP, protocol, TCP Freeze, packet transmission, phase.

С. Г. Семенов, О. В. Ліпчанська, М. В. Ліпчанський

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

АНАЛІЗ МЕТОДІВ УПРАВЛІННЯ ПЕРЕДАЧЕЮ ВІДЕОПОТОКУ ДАНИХ ТА ВИМОГ ДО ЯКОСТІ ЇХ ПЕРЕДАВАННЯ

Викладені результати аналізу існуючих вимог до якості передавання відеотрафіка у комп'ютеризованих системах критичного застосування з бездротовими каналами зв'язку на базі мережі 4G. Був проведений аналіз методів управління процесом передавання відеотрафіка в мережах 4G. Розглянуті алгоритми контролю навантаження мережі, алгоритми управління чергами та алгоритми управління буферами у терміналах зв'язку та виділені найбільш ефективні для роботи з відеотрафіком в режимі реального часу. Проведений порівняльний аналіз методів математичної формалізації процесів управління відеотрафіком в бездротових мережах 4G. Порівняльний аналіз методів математичної формалізації процесів управління відеотрафіком показав, що доцільно застосовувати системи масового обслуговування для аналізу і моделювання процесів передавання відеотрафіка в бездротових мережах.

Ключові слова: відеотрафік, показники якості передавання даних, комп'ютеризована система критичного застосування.

Вступ

Постановка проблеми. Забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті є одним з найбільш пріоритетних завдань, що вирішуються в Міністерстві Інфраструктури України. У нормативних документах [1, 2] зафіксовано, що основним принципом забезпечення безпеки є вдосконалення системи управління безпекою руху поїздів шляхом впровадження сучасних комп'ютерних технологій і засобів. Однією з сучасних комп'ютеризованих систем критичного застосування є цифрова система відеоспостереження реального часу. Оскільки безпека забезпечується в тому числі і на рухомих об'єктах, то необхідно застосовувати бездротові мережі передавання даних. Так як обсяг відеоінформації з відеокамер в режимі реального часу великий, то оптимальним рішення є застосування мережі 4G. У зв'язку з впровадженням і розвитком в Україні мережі 4G актуальними є питання необхідної якості обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних комп'ютеризованих систем критичного застосування [3, 4] показав, що для забезпечення безпеки руху поїздів ефективно використовуються телеметричні системи, які відповідають безпосередньо за безпеку поїзда, і системи інтервального регулювання руху поїздів, які регулюють відстань між поїздами. Однак не існує системи візуалізації ділянок руху, які б виконували спостереження за небезпечними ділянками руху під час руху рухомого складу. Тому перспективним і актуальним напрямком є використання цифрових систем відеоспостереження реального часу, зокрема безпосередньо у кабіні машиніста, в вантажних відсіках, на залізничних переїздах та інших аварійно-небезпечних ділянках. В даний час ефективно використання систем відеоспостереження реального часу неможливе без забезпечення основних вимог якості послуг передавання відеопотоку даних, які наведені в [5].

Формулювання мети статті. Метою статті є: проведення аналізу існуючих вимог до якості передавання відеотрафіка в бездротових мережах і виділення найбільш істотних цільових показників якості передавання відеотрафіка для комп'ютеризованих

систем критичного застосування; аналіз методів управління процесом передавання відеотрафіка в мережах 4G; аналіз алгоритмів завадостійкого кодування в мобільних мережах; порівняльний аналіз методів математичної формалізації процесів управління відеотрафіком.

Результати досліджень

Виклад основного матеріалу. При розробці цифрової системи передавання відеотрафіка в залізничному транспорті можна виділити кілька груп характеристик якості обслуговування [5]. Загальна спрощена схема приведена на рис. 1.

Серед виділених характеристик якості обслуговування при передаванні відеотрафіка по бездротових мережах найбільш пріоритетними є якісні характеристики передавання даних, при цьому одним з основних показників якості передавання є достовірність, яка в свою чергу характеризується ймовірністю втрати пакета і ймовірністю помилкового прийому, що було визначено в результаті аналізу рекомендацій Міжнародного Союзу Електрозв'язку [6] щодо показників якості передавання відеотрафіка, рис. 2.

На підставі даних, отриманих з [7, 8], виділені основні показники якості передавання різних типів даних в бездротових мережах 4G та наведені у табл. 1.

Аналіз вимог до якості обслуговування показав, що потоковий відеотрафік в режимі реального часу чутливий до затримок, джиттеру і величини ймовірності втрати / спотворення пакетів. Недотримання допустимих значень даних показників тягне за собою падіння достовірності переданих даних, до яких застосовуються гранично високі вимоги.

В даний час у зв'язку зі збільшенням кількості послуг, що надаються в мережах 4G, а також з особливостями структури управління залізницею виникають складнощі із забезпеченням розглянутих вимог до якості передавання відеотрафіка. Дані проблеми пов'язані з недосконалістю протоколів управління і фізичних засобів передавання даних, ненадійністю передавання даних по бездротовій мережі і з нестабільністю характеристик каналу зв'язку під час руху рухомого складу.

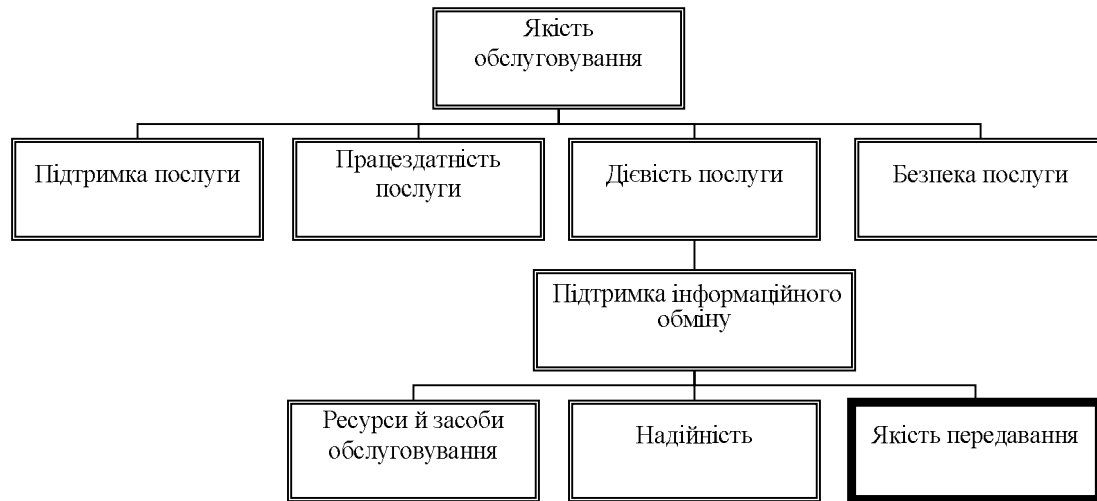


Рис. 1. Спрощена схема характеристик якості обслуговування



Рис. 2. Цільові показники якості передавання відеотрафіка

Таблиця 1. Припустимі значення показників якості передавання різних типів даних

Приклад послуги	Ймовірність доставки пакета не за адресою, PIR	Ймовірність прийому пакета з помилкою, PER	Типові швидкості передавання даних	Затримка пакета, мс	Джитер затримки, мс	Ймовірність втрати пакета, PLR
Розмовне відео (реальне потокове – відеотелефон)	10^{-3}	10^{-7}	16 – 384 кбіт/с	150	<10	10^{-3}
Нерозмовне відео (буферезоване потокове)	10^{-6}	10^{-6}	16 – 384 кбіт/с	300	<10	10^{-6}
Сигнальний трафік	10^{-6}	10^{-6}		100	<10	10^{-6}
Голос, відео (реальне потокове)	10^{-8}	10^{-7}	32 – 384 кбіт/с	100	–	10^{-3}
Інтерактивні ігри	10^{-8}	10^{-7}	<1 кБ	100	–	10^{-3}
На основі TCP (www, e-mail, чат, FTP та ін.)	10^{-6}	10^{-7}	<10 кБ	300	–	10^{-6}

Ефективне вирішення завдання забезпечення заданого рівня достовірності при передаванні відеотрафіка по бездротовому каналу пропонується при спільному використанні і оптимізації методів завадостійкого кодування і методів управління процесом передавання відеотрафіка.

Алгоритми завадостійкого кодування для мереж мобільного зв'язку. В якості методів підвищення достовірності передавання даних використовуються згортальні коди [9]; турбокоди: послідовні

каскадні коди на основі алгебраїчних блокових кодів і згортальних кодів, паралельні каскадні коди на основі згортальних кодів; коди з малою щільністю перевірок на парність (LDPC) [10]; блокові коди добуток [11]; полярні коди [12]. У мережах на основі пакетного передавання даних розглянуті коди застосовуються на фізичному, каналному, мережевому і транспортному рівнях. Недоліком даних кодів є відносно висока складність практичної реалізації декодування, а їх основне застосування – вияв-

лення і виправлення помилок в прийнятих пакетах, в той час, як при передаванні мультимедіа даних потрібне відновлення загублених пакетів, на що розглянуті коди не здатні.

Дослідження показали, що на відміну від блокових і згортальних кодів, стираючі коди (Digital Fountain Codes) мають можливість відновлювати втрачені пакети, тому їх застосування дозволяє відправляти дані по ненадійним каналах зв'язку, якими є бездротові канали щодо надійності передавання пакетів [13].

Найпоширенішими кодами даного класу є код Лабі [14], основним недоліком якого є велика затримка сигналу між двома вузлами, що неприйнятно при передаванні відеотрафіка в режимі реального часу, і коди Шокролахі – послідовні каскадні кодові конструкції на основі кодів з фіксованою швидкістю і кодів Лабі – які більш ефективні при передаванні мультимедіа трафіку по бездротових каналах мобільного мережі [15, 16].

Аналіз методів управління процесом передавання відеотрафіку. Проведені дослідження дають підставу вважати, що при управлінні трафіком виникає безліч проблем, пов'язаних з гетерогенністю сучасних комп'ютеризованих мереж, з великими навантаженнями на мережі, а також з особливістю сучасних комп'ютеризованих бездротових мереж 4G, які функціонують спільно з провідними мережами [17].

Аналіз алгоритмів контролю навантаження мережі показав, що проблема вирівнювання швидкості передавання даних може бути вирішена за допомогою алгоритмів Token Bucket і Leaky Bucket, принципово відмінністю яких є контрольована (з урахуванням пріоритетів) і неконтрольована втрата пакетів даних.

Алгоритми управління чергами виступають механізмом боротьби з перевантаженнями в мережах, пов'язаними з появою значних черг через пульсуючий характер трафіку. Найбільш використовувані алгоритми: FIFO, алгоритм зважених черг (Weighted Queuing), алгоритм пріоритетних черг (Priority Queing), алгоритм зважених справедливих черг (Weighted Fair Queuing). Порівняльний аналіз алгоритмів керування чергами показав, що алгоритм Priority Queing найбільш підходить для обслуговування відеотрафіка в режимі реального часу, оскільки для трафіку з пріоритетами забезпечує мінімальні затримки.

При розгляді алгоритмів управління буферами були виділені найбільш відомі, такі як алгоритм довільного раннього виявлення переповнення (Random Early Detection) та зважений алгоритм довільного раннього виявлення переповнення (Weighted Random Early Detection). Останній алгоритм є більш ефективним при застосуванні його для передавання відеотрафіка в режимі реального часу, оскільки враховує пріоритетність пакетів.

Для моделювання процесів передавання відеотрафіка в розподілених системах було проведено порівняння методів математичної формалізації процесів управління трафіком [18].

Методи математичної формалізації процесів управління трафіком. Як показали дослідження, процеси управління трафіком ефективно формалізуються на базі тензорних моделей, графових моделей, нейронних мереж і мереж масового обслуговування.

Серед достоїнств використання тензорних моделей можна виділити можливість обліку показників, які змінюються в процесі функціонування. При використанні тензорних моделей виникає складність в описі моделі і необхідність її розбиття на прості моделі, що відноситься до недоліків даного методу.

Серед переваг використання графових моделей можна виділити здатність пошуку найкоротшого шляху і здатність оптимізації топології бездротової комп'ютерної мережі; до недоліків відносяться неможливість обліку динамічно змінюваних характеристик потоку вхідних даних і відсутність даних для прогнозування поведінки бездротової комп'ютерної мережі в умовах зовнішніх впливів.

Використання нейронних мереж дає можливість обліку зовнішніх впливів на бездротову комп'ютерну мережу, але має такі недоліки, як тривалість часу навчання мережі і негнучкість щодо динамічних змін в процесі передавання даних. Підхід із застосуванням мереж масового обслуговування має доведену ефективність, є простим у використанні при моделюванні і забезпечує адекватність моделі.

В результаті розглянутих характеристик цих методів можна виділити систему масового обслуговування, як найбільш ефективний інструмент для математичного моделювання процесів передавання відео даних в розподілених системах.

Висновки

У даній статті в результаті досліджень існуючих вимог до якості передавання відеотрафіка в бездротових мережах було виділено найбільш істотний показник для комп'ютеризованих систем критичного застосування, а саме достовірність, яка характеризується ймовірністю втрати пакетів і ймовірністю прийому пакетів з помилкою. Проведений аналіз методів управління процесом передавання відеотрафіка в мережах 4G показав, що через виявлені недоліки найбільш перспективними для роботи представляються алгоритм управління буферами Weighted Random Early Detection, алгоритм управління чергами Priority Queing і алгоритм контролю за навантаженням Token Bucket (в режимі маркування) з необхідністю їх подальшого удосконалення для обліку високої пріоритетності і підвищених вимог до достовірності передавання відеотрафіка по бездротових мережах в режимі реального часу. Серед розглянутих алгоритмів завадостійкого кодування в мережах мобільного зв'язку були виділені фонтанні коди, застосування яких найбільш ефективно в бездротових мережах. Порівняльний аналіз методів математичної формалізації процесів управління відеотрафіком показав, що доцільно застосовувати системи масового обслуговування для аналізу і моделювання процесів передавання відеотрафіка в бездротових мережах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Верховна Рада України [Електронний ресурс]: наказ про затвердження Положення про систему управління безпекою руху поїздів у Державній адміністрації залізничного транспорту України. / Міністерство Інфраструктури України. – 2011. – Режим доступу до наказу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0729-11>.
2. Верховна Рада України [Електронний ресурс]: постанова про затвердження Державної цільової програми реформування залізничного транспорту на 2010-2019 роки. / Кабінет Міністрів України. – 2009. – Режим доступу до постанови: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1390-2009-%D0%BF>.
3. ИРЗ. [Електронний ресурс]: локомотив. Каталог продукції. – 2014. – С. 22. Режим доступа: www.irz.ru.
4. ИРЗ. [Електронний ресурс]: комплексное локомотивное устройство безопасности КЛУБ-У. Режим доступа: <https://www.irz.ru/products/20/70.htm>.
5. ITU-T Recommendation E.800. Definitions of terms related to quality of service. – 2008.
6. ITU-T Recommendation E.802. Framework and methodologies for the determination and application of QoS parameters. – 2007.
7. Alcatel-Lucent Inc. [Електронний ресурс]: The LTE Network Architecture. – 2009. Available: http://www.cse.unt.edu/~rdantu/FALL_2013_WIRELESS_NETWORKS/LTE_Alcatel_White_Paper.pdf.
8. ETSI TR 103 210 V1.1.1. Speech and multimedia Transmission Quality (STQ); End-to-End Jitter Transmission Planning Requirements for Real Time Services in an NGN context. – 2013.
9. Штомпель Н.А. Тенденции развития методов помехоустойчивого кодирования информации в телекоммуникациях. Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація. – 2017. – С. 35-37.
10. Dahlman E. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G: Third Edition. / E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold // Academic Press. – 2016. – 616 p.
11. Козлов А.В. Подход к построению блочно-перестановочных кодов с малой плотностью проверок на четность. / А.В. Козлов, Е.А. Крук, А.А. Очинников // Вопросы хранения и передачи информации. Изв. Вузов Приборостроение. / Т. 56, №8. – 2013. – С. 9-13.
12. Li J. On the Performance of High-Rate TPC/SPC Codes and LDPC Codes Over Partial Response Channels. / J. Li, R. Narayanan, E. Kurtas, C.N. Georghiadis // IEEE Transactions on Communications. / V.50, N5. – 2002. – P.723-734.
13. MacKay D.J.C.. Fountain codes. Capacity approaching codes design and implementation special section. IEE Proc. Commun., Vol. 152, No. 6. – 2005.
14. Luby M. LT Codes. Proc. of the 43rd Annual IEEE Symp. on Foundations of Computer Science (FOCS). – 2002. – P. 271-282.
15. Shokrollahi A. Raptor codes / A. Shokrollahi // IEEE Trans. on Inf. Theory. – 2006. – Vol. 52. – № 6. – P. 2551-2567.
16. Stallings W. Foundations of Modern Networking: SDN, NFV, QoE, IoT, and Cloud. / W. Stallings // Pearson Education, Inc., Old Tappan, New Jersey. – 2016. – 544 p.
17. Kuchuk G., Kharchenko V., Kovalenko A., Ruchkov E. Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems. East-West Design & Test Symposium (EWDTS). 2016. Pp. 1-6. doi:<https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.
18. Ремицкая А. Я. Марковские процессы и простейшие модели теории массового обслуживания. Компьютерное моделирование простейших моделей массового обслуживания. / А.Я Ремицкая, И.А. Суслина // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. / С-Пб: ИТМО – 2007. – С. 239-248.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г. А. Кучук,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.04.2018

Анализ методов управления передачей видеопотока данных и требований к качеству их передачи

С. Г. Семенов, О.В. Липчанская, М.В. Липчанский

В статье изложены результаты анализа существующих требований к качеству передачи видеотрафика в компьютеризированных системах критического применения с беспроводными каналами связи на базе сети 4G. Был проведен анализ методов управления процессом передачи видеотрафика в сетях 4G. Рассмотрены алгоритмы контроля нагрузки сети, алгоритмы управления очередями и алгоритмы управления буферами в терминалах связи и выделены наиболее эффективные для работы с видеотрафиком в режиме реального времени. Проведен сравнительный анализ методов математической формализации процессов управления видеотрафика в беспроводных сетях 4G. Сравнительный анализ методов математической формализации процессов управления видеотрафика показал, что целесообразно применять системы массового обслуживания для анализа и моделирования процессов передачи видеотрафика в беспроводных сетях.

Ключевые слова: видеотрафик, показатели качества передачи данных, компьютеризированная система критического применения.

Analysis of video data transmission methods and requirement for the quality of their transmission

S. Semenov, O. Lipchanska, M. Lipchanskyi

The article presents the results of the analysis of existing requirements to the quality of video transmission in mission-critical computer systems with wireless communication channels based on the 4G network. An analysis was made of the methods for managing the transmission of video traffic in 4G networks. The algorithms of network load control, queue management algorithms and buffer management algorithms in communication terminals are considered and the most effective ones for working with video in real time mode are identified. The comparative analysis of methods of video management processes mathematical formalization in wireless networks 4G is made. Comparative analysis of the methods of mathematical formalization of video traffic control processes has shown that it is expedient to apply mass service systems for analyzing and simulating the transmission of video traffic in wireless networks.

Keywords: videotraffic, data transmission quality indicators, mission-critical computer system.

V. Smoliar, I. Sliusar, I. Chernytska, V. Knysh, O. Orysenko

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University, Poltava, Ukraine

INCREASING THE PRODUCTIVITY OF THE BRIDGE CRANE DUE TO THE INTRODUCTION OF ARDUINO'S HARDWARE AND SOFTWARE BASE IN ITS CONTROL SYSTEM

The research results of the possibility of increasing the productivity of the bridge crane through the introduction of hardware and software base Arduino in its control system are given in the article. The indexes of technical productivity of batch operation lift and carry machines of periodic action are analyzed and the working cycle duration has been shortened. Several cases (successive execution – each subsequent movement only begins after the end of the previous one; partial combination – combine only a few separate movements are combined; full alignment – all crane movements with the load are combined in time) is considered. In this article, based on the results of the analysis, the control of the load-lifting machine was built due to the introduction of telecommunication systems and technologies, namely the use of microcontrollers with the implementation of control using wired (Ethernet) or wireless (Bluetooth, Wi-Fi) network. Because there is the need to increase the productivity of lift and carry machines, to improve the working conditions of personnel, to improve the reliability and durability of machine elements, causes the creation of new, more advanced systems of machine management and partial or complete automation of their work. Safety in the production will increase significantly with this technology, as it will be possible to implement protection against overload, excess speed, rocking, moving cargo to areas where people are located and so on the results of the article are shown. Crane management can be done either from the operator's cab, directly controlled by the controller, or remotely, by transmitting signals over wired (Ethernet) or wireless (Bluetooth, Wi-Fi) networks.

Keywords: bridge crane, automation, controller, technical performance, combination of working operations, Arduino, Ethernet, Bluetooth, Wi-Fi, lift and carry machine, load-lifting machine.

Introduction

Problem statement. The need to increase the productivity of lift and carry machines, to improve the working conditions of personnel, to improve the reliability and durability of machine elements, causes the creation of new, more advanced systems of machine management and partial or complete automation of their work.

Even partial automation of some processes of the load-lifting machines leads to a significant increase in its productivity.

Thus, for example, automatic smooth reduction of speed before stopping and ensuring accurate landing of cargo allow to increase the speed of goods and empty crane hook movement, which leads to a decrease in the required number of lift and carry machines, to reducing the number of servicemen, improving the working hours of the machine and to improving working conditions of employees [1].

The automation of the load-lifting machine also has a significant effect in such cases, for example, when performing assembly work with large-sized products, as well as during unloading of holds of vessels, when it is impossible to see the position of a crane hook and load from the cockpit, and the connection between the crane operator and the worker, who is in close proximity to the cargo is complicated. The use of portable remote control increases the accuracy of assembly and reloading operations, as maintenance staff can be located in close proximity to the transported object.

Remote control is also necessary in cases when, under conditions of performance, maintenance staff must be located at a distance from the moving cargo.

Achievement of the indicated results at a high level is possible only at the expense of introduction of telecommunication systems and technologies in the means of controlling the load-lifting machine.

Analysis of research and publications on this problem. Systems of electronic control and control of load-lifting equipment are widely used in different countries of the world and are relevant for implementation in various spheres of activity.

Examples of the application of such technologies are presented in [4-8].

The purpose of this article is to highlight the results of the study of the possibility of increasing the productivity of the bridge crane due to the use of in microcontrollers its means of control.

The main content

The technical performance of batch operation of lift and carry machines, which include bay cranes, is expressed in t/h and is calculated by equation:

$$Q = q \cdot a \cdot n, \quad (1)$$

where q is load-carrying capacity of the machine;

a is a coefficient of the car use per load-carrying capacity;

n is a number of cycles that a car performs in one hour of work.

The number of cycles n is calculated as:

$$n = \frac{3600}{t_s} \quad (2)$$

where t_s is the duration of one cycle in seconds.

After analyzing these mathematical dependencies, it was concluded that by reducing the duration of one

cycle, an increase in machine productivity can be achieved.

The duration of a cycle depends on a number of factors and is determined by the formula:

$$t_s = t_w + t_a, \tag{3}$$

where t_w is the time spent by the crane on moving the cargo along on the spatial trajectory;

t_a is time spent on auxiliary operations, for example, seizure of goods.

If you do not take into account the possibility of automatic capture of cargo, then its possible to shorten the duration of the working cycle by reducing the time to perform crane work movements. Several cases are possible:

- successive execution – each subsequent movement only begins after the end of the previous one;
- partial combination – combine only a few separate movements are combined;
- full alignment – all crane movements with the load are combined in time.

Thus, for a bridge crane with a consistent performance of working motions, the duration of a cycle is calculated according to the following formula [2]:

$$t_s = \frac{4H}{V_0} + 2\left(\frac{l_1}{V_1} + \frac{l_2}{V_2}\right) + t_a, \tag{4}$$

where H, l_1, l_2 are respectively, the average values of the load lifting height, the distance of the crane and the cart movement;

V_0, V_1, V_2 , are respectively, the speed of lifting the load, the movement of the crane and of freight truck;

t_a is the time spent on auxiliary operations.

For stacker cranes with automatic control the cycle time is calculated taking into account the alignment of movement along the rack with vertical movement [2]:

$$t_s = 2\left(\frac{l_1}{V_1} + \frac{l_2}{V_2}\right) + t_a \tag{5}$$

Comparing the given formulas, a significant time saving in the case of automatic control and combination of work movements (in the formula for calculating the duration of the working cycle for the stacker crane there is no component $4 \cdot H/V_0$, which determines the time of vertically cargo movement) can be notice (fig. 1).

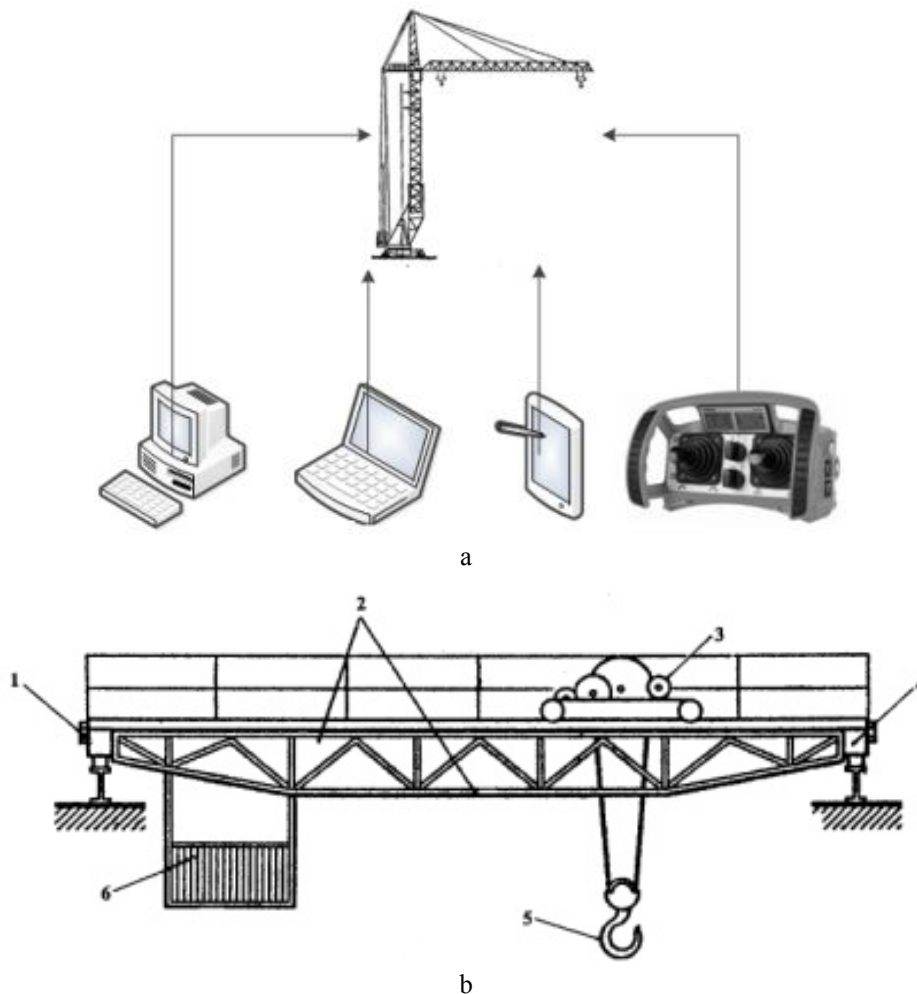


Fig. 1. Options for managing the crane with different devices

However, it is not possible to achieve the optimal combination of worker movements only at the expense

of the operator's qualifications. This is due to his abilities. So, according to [3], if a crane operator is highly

qualified, it is possible to combine only two and in some cases (with small work intensity) three working movements.

Thus, the maximum possible reduction in the duration of the working cycle, which can be achieved under these conditions, is 20-30 % and in calculations it is given by introducing the coefficient of combination of working motions whose value is: for bridge cranes – 0,8, for mobile jibs – 0.7.

Having examined the existing technology, Arduino hardware and software base was selected. The software part consists of a free software program (IDE) for writing software and hardware firmware. The hardware part is a set of finished PCBs, manufactured by both the official manufacturer and third parties.

The fully open architecture of the system makes it easy to copy and complement the line of Arduino products. Arduino can be used both to create stand-

alone objects and to connect to external control devices.

For the management of analogue crane systems, you only need to use an Arduino (Uno , Mega , or other) card , several relays that lock analogue control circuits. Also need a control device, which can be either keys, sliders or even a joystick, and even a computer or a mobile phone are needed.

To provide remote control, you need to connect Arduino to the Internet using a private network and the web-interface will probably be able to manage it from almost anywhere in the world.

Also, this hardware base gives an opportunity to install sensors of different types, which will be able to monitor the parameters and location of the cargo. After that, it will be possible to organize the output of various types of information on the monitor or control panel (fig. 2).

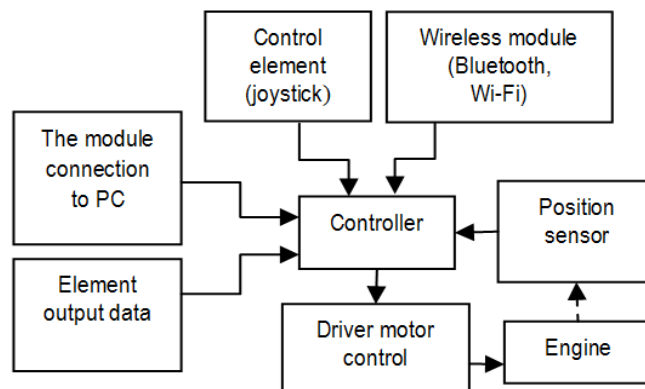


Fig. 2. Interconnection of components of an automated crane control system

Management will be carried out by such an algorithm. The control board (Arduino) tracks the position of the joystick, generates a signal that triggers the relay and activates the relay, which in turn will start the engine to perform one or another operation. However, such a method will not give you precision in control and everything will depend on the operator. Therefore it is necessary to use a method that would give an opportunity to track location. For example, to install sensors that will mark exactly where the carriage.

Such sensors can be created with the help of different technologies, for example, it is possible to establish a special line along the entire distance of motion and an optical sensor that would count on it. It is also possible to set a ruler on the engine axis that would track the engine, which in turn could also allow you to track the location by calculating the number of revolutions per unit distance. Thus, it is possible to arrange automatic motion, by programming the movement at the desired distances, which will be listed by the algorithm in the desired number of engine revolutions.

Crane management can be done either from the operator's cab, directly controlled by the controller, or remotely, by transmitting signals over wired (Ethernet) or wireless (Bluetooth, Wi-Fi) networks.

Safety in the production will increase significantly with this technology, as it will be possible to implement protection against overload, excess speed, rocking, and so on. Also, if a beacon is installed in an employee's helmet, this will allow to track the position of employees and based on these data, it will be possible to safely move the goods from one point to another without endangering people.

Conclusions

As a result of studying the possibilities of increasing the productivity of the bridge crane, the following is established:

- an effective way to increase the productivity of a batch operation lift and carry machine is to reduce the duration of the working cycle due to the combination of separate movements of the load;
- it is impossible to achieve a significant combination of separate movements only at the expense of the operator's qualification;
- the optimal combination of working movements and the choice of the optimal trajectory of cargo movement is possible due to the application;

The most advantageous option of control systems automation for crane mechanisms in today's conditions is the use of hardware and software base Arduino.

REFERENCES

1. Aleksandrov, M.P. (1979), Podemno-transportnyie mashiny [Load-Lifting machinery], Vyssh. shkola, Moscow, 558 p.
1. Demichev, G.M. (1991), Skladscoe i tamoe hozyaystvo [Storage facilities and container resources], Vyssh. shk., Moscow, 192 p.
2. Vaynson, A.A. (1989), Podemno-transportnyie mashiny [Load-Lifting machinery], Mashinostroenie, Moscow, 586 p.
3. Best Container Terminal Design in Action [online], Available at: <https://youtu.be/2t2cqiQl0BE>.
4. E3 Berth automation technologies for ports [online], Available at: <https://youtu.be/NWsUCDyKQdQ>.
5. Automatic Stacking Cranes [online], Available at: <https://youtu.be/watch?v=8E0-EUdtDF8>.
6. Oborudovanie dlya avtomatizirovannoy kladki kirpichnyih sten [online] Available at: <https://youtu.be/tojKajx3oBE>.
7. Building a House with Using Bricks Latest Technology Construction. [online] Available at: https://youtu.be/watch?v=qNUMCtCV_so.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. П. Є. Пустовойтов,
Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава
Received (Надійшла) 26.03.2018
Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

Повышение производительности мостового крана за счет применения в его системы управления аппаратно-программных базы Arduino

В. Г. Смоляр, И. И. Слюсарь, И. А. Черницкая, В. В. Книш, А. В. Орисенко

В статье приведены результаты исследований возможности повышения производительности мостового крана за счет внедрения в его системы управления аппаратно-программной базы Arduino. Проанализированы показатели технической производительности подъемно-транспортных машин периодического действия и проведено сокращение продолжительности рабочего цикла. Рассмотрены несколько случаев (последовательное выполнение - каждый последующий движение начинается только после завершения предыдущего; частичное совмещение - совмещаются лишь несколько отдельных движений; полное совмещение - все движения, которые кран может оказывать грузу совмещены во времени). В данной статье по результатам проведенного анализа построены управления грузоподъемной машиной за счет внедрения телекоммуникационных систем и технологий. Такими технологиями могут быть - применение микроконтроллерных средств с реализацией управления с применением проводной (Ethernet) или беспроводной (Bluetooth, Wi-Fi) сети. Потому что существует необходимость повышения производительности подъемно-транспортных машин, улучшение условий труда обслуживающего персонала, повышение надежности и долговечности элементов машины возникает необходимость создания новых, более совершенных систем управления машинами и частичной или полной автоматизации их работы. В результатах статьи было показано, что безопасность на производстве значительно увеличится с помощью данной технологии, ведь возможно будет реализовать защиту от перегрузки, превышения скорости перемещения, раскачивания, перемещения груза в зоны, где находятся люди и прочее, а управление краном возможно реализовать как из кабины оператора, управляя непосредственно контроллером, так и дистанционно передавая сигналы по проводной (Ethernet) или беспроводной (Bluetooth, Wi-Fi) сети.

Ключевые слова: мостовой кран, автоматизация, контроллер, техническая производительность, совмещение рабочих операций, Arduino, Ethernet, Bluetooth, Wi-Fi, подъемно-транспортное машина, грузоподъемная машина.

Підвищення продуктивності мостового крана за рахунок застосування в його системах керування апаратно-програмної бази Arduino

В. Г. Смоляр, І. І. Слюсарь, І. О. Черницька, В. В. Книш, О. В. Орисенко

У статті наведено результати досліджень можливості підвищення продуктивності мостового крана за рахунок впровадження в його системи керування апаратно-програмної бази Arduino. Проаналізовано показники технічної продуктивності підйомно-транспортних машин періодичної дії та проведено скорочення тривалості робочого циклу. Розглянуто декілька випадків (послідовне виконання - кожний наступний рух починається лише після завершення попереднього; часткове суміщення - суміщаються лише декілька окремих рухів; повне суміщення - всі рухи, які кран може надавати вантажеві суміщені в часі). У даній статті за результатами проведеного аналізу побудовано керування вантажопідйомною машиною за рахунок впровадження телекомунікаційних систем та технологій. Такими технологіями можуть бути - застосування мікроконтролерних засобів з реалізацією управління із застосуванням дротової (Ethernet) чи бездротової (Bluetooth, Wi-Fi) мережі. Тому що існує необхідність підвищення продуктивності підйомно-транспортних машин, покращення умов праці обслуговуючого персоналу, підвищення надійності та довговічності елементів машини виникає потреба створення нових, більш досконалих систем керування машинами та часткової чи повної автоматизації їх роботи. У результатах статті було показано, що безпека на виробництві значно збільшиться за допомогою даної технології, адже можливо буде реалізувати захист від перевантаження, перевищення швидкості переміщення, розгойдування, переміщення вантажу в зони, де перебувають люди та інше, а керування краном можливо реалізувати як з кабіни оператора, керуючи безпосередньо контролером, так і дистанційно передаючи сигнали по дротовій (Ethernet) чи бездротовій (Bluetooth, Wi-Fi) мережі.

Ключові слова: мостовий кран, автоматизація, контролер, технічна продуктивність, суміщення робочих операцій, Arduino, Ethernet, Bluetooth, Wi-Fi, підйомно-транспортна машина, вантажопідйомна машина.

Ф. І. Шилов, М. А. Скулиш, А. Сафарян

Національний технічний університет України “КПІ імені І. Сікорського”, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДУ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ РЕСУРСІВ ДЛЯ БІЛІНГОВИХ СИСТЕМ

Якість послуг і дохід операторів мобільного зв'язку суттєво залежить від продуктивності та ефективності білінгових систем, що обробляють потоки вхідних заявок на обслуговування. Щоб на вхідних інтерфейсах білінгової підсистеми не виникали черги оброблюваних даних, необхідно контролювати об'єм вхідного потоку, підтримувати оптимальне навантаження і своєчасно планувати розширення білінгових підсистем, що обробляють такий потік. У даній статті запропоновано математичну модель пошуку оптимального навантаження на систему обслуговування із раннім виявленням перевантаження, яка дозволить забезпечити обслуговування із заданими показниками ефективності, а саме із заданою ймовірністю час обслуговування сервісів у системі онлайн тарифікації. На основі статистичних даних оператора зв'язку розроблено імітаційну модель системи обслуговування для різних масштабів, яка показала як при перевищенні допустимого розрахованого значення оптимального навантаження збільшується кількість відмов у обслуговування.

Ключові слова: якість обслуговування, система онлайн тарифікації, алгоритм раннього виявлення перевантажень, оптимізація ресурсів мережі, динамічне керування ресурсами, хмарні обчислення.

Вступ

На сьогоднішній день спостерігається перенасичення ринку пропозиціями мобільних операторів. Переважаюча частина населення вже підключена до одного або, навіть, кількох мобільних операторів одночасно. Конкурентоспроможність у більшій степені залежить від здатності утримати існуючих абонентів, ніж від залучення нових.

Лояльність абонентів напряму залежить від рівня якості наданих послуг; пропозиції надання нових сервісів; швидкості роботи сервісів. Якість повинна, якщо не стабільно покращуватись, то утримуватись на достатньо високому рівні.

У сучасному світі об'єми інформації, що передається, невпинно збільшуються, що, у свою чергу, потребує постійного розширення пропускних можливостей мобільної мережі. Як наслідок, навантаження на внутрішні підсистеми обробки трафіку збільшуються, при цьому критично важливо уникнути перенавантажень на компонентах мережі, втрати даних і черг на обробку замовлень.

Дохід оператора мобільного зв'язку напряму залежить від організації процесу контролю фінансового стану рахунку (балансу) абонента - точності списання коштів абонента у режимі реального часу. Це дозволяє уникнути дебіторської заборгованості і підвищити комфорт користування послугами оператора.

Описані вище фактори визначають роль білінгової системи, як одного з головних компонентів в організації всього бізнес-процесу.

Якість послуг і дохід операторів мобільного зв'язку суттєво залежить від того, наскільки правильно розрахована продуктивність та ефективність білінгових систем, що обробляють потоки вхідних заявок на обслуговування викликів тарифікації. Для білінгових підсистем, які надають послуги по списанню коштів абонента у режимі реального часу, важливою характеристикою роботи є обробка вхідних заявок в найкоротші терміни, без створення черги.

Щоб на вхідних інтерфейсах білінгової підси-

стеми обслуговування викликів тарифікації не виникали черги оброблюваних даних, необхідно контролювати об'єм вхідного потоку, підтримувати оптимальне навантаження і своєчасно планувати розширення білінгових підсистем, що обробляють такий потік. Вибраний метод дозволяє провести розрахунок рекомендованого значення інтенсивності вхідного потоку на існуючій білінговій підсистемі, порівняти його з доступними метриками продуктивності і спланувати рекомендоване розширення білінгових модулів при прогнозованому збільшенні вхідного потоку.

Результати досліджень

Метод формування вхідного потоку навантаження для ефективного використання ресурсів обслуговування. Основна ідея методу полягає в тому, щоб виходячи з ергодичного розподілу для можливих станів системи сформувати вимоги до середнього значення вхідного навантаження, що дозволить максимально ефективно використовувати наявні фізичні ресурси обслуговування вхідного потоку заявок. Процес обслуговування моделюється як n -каналний обслуговуючий пристрій, час обслуговування заявки у каналі є випадковою величиною розподіленою за законом Пуассона.

Вхідні дані.

n – кількість каналів для одночасного обслуговування заявок.

μ – інтенсивність обслуговування заявки,

G – кількість ресурсів залучених для обслуговування заявок,

ν^g – об'єм g -го ресурсу необхідний для обслуговування у блоці однієї заявки, $g = 1 \dots G$;

I^g – доступний об'єм ресурсу g -го ресурсу який спільно використовується заявками.

s – допустима кількість запитів у черзі на обслуговування.

R – відсоток заявок, які обслуговуються у системі не більше допустимого часу затримки, визначається експертами.

l – кількість запитів у черзі, до досягнення якої блокується надходження запитів до системи, відповідно до алгоритмів раннього попередження перевантажень.

Вихідні дані.

λ – рекомендоване значення для інтенсивності вхідного потоку, який буде направлено на обслуговування у s -каналний обслуговуючий пристрій.

Застосування запропонованого методу складається з двох етапів.

Етап 1. Для багатоканальної системи обслуговування, відповідно до моделей К. Жернового, необхідно знайти ергодичний розподіл кількості заявок у системі за формулами:

$$p_0 = \frac{1 - \beta^{s-l}}{A_n(\alpha, \beta)}, \quad \beta \neq 1, \quad \alpha = \lambda/\mu, \quad \beta = \lambda/n$$

$$A_n(\alpha, \beta) = (1 - \beta^{s-l}) \sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!} + \frac{\alpha^n}{n!} \left(\frac{\beta - \beta^{s-l+1}}{1 - \beta} - (s-l)\beta^{s+1} \right)$$

$$p_k = \frac{\alpha^k}{k!} p_0 \quad (k = \overline{1, n})$$

$$p_{n+k} = \frac{\alpha^n}{n!} \beta^k p_0 \quad (k = \overline{1, l})$$

$$p_{n+k} = \frac{\alpha^n \beta^k - \beta^s}{n! (1 - \beta^{s-l})} p_0 \quad (k = \overline{l+1, s-1})$$

$$p_{n+s} = \frac{\alpha^n (1 - \beta) \beta^s}{n! A_n(\alpha, \beta)} \quad (k = \overline{n+l+1, n+s-1})$$

Якщо $\beta = 1, \alpha = \lambda/\mu, \beta = \lambda/n$, тоді

$$p_k = \frac{n^k}{k!} p_0 \quad (k = \overline{1, n}); \quad p_{n+k} = \frac{n^n}{k!} p_0 \quad (k = \overline{1, l});$$

$$p_{n+s} = \frac{n^n}{n!} p_0 (s-l-1) p_{n+s} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_{n+s} = \frac{n^n}{n! (s-l)} p_0 \quad (k = \overline{n+l+1, n+s-1});$$

$$p_{n+k} = \frac{n^k}{n!} p_0 - (k-l) p_{n+s} = \frac{n^n}{n!} \frac{s-k}{s-l} p_0 \quad (k = \overline{l+1, s-1})$$

Етап 2. Розв'язання оптимізаційної задачі пошуку максимального вантаження, що забезпечить виконання умов на допустимому кількості ресурсів обслуговування.

$$\lambda \rightarrow \max \begin{cases} 4 * \left(\sum_{i=1}^n i v_k^g p_i + n v_k^g \sum_{i=n+1}^s p_i \right) \leq V^g, g = \overline{1, G} \\ \sum_{i=1}^s p_i \leq R \end{cases}$$

У білінгвовій підсистемі балансування вхідного потоку відбувається з використанням модифікованої схеми циклічного розбору (Round Robin), для розрахунку рекомендованого значення інтенсивності вхідного потоку всієї системи буде достатньо проаналізувати метрики з одного DOCS сервера і масштабувати отримані значення на всю підсистему.

Для підстановки вхідних даних буде використана метрика DOCS-OCS-Congestion, зібрана на стороні одного DOCS сервера (Diameter-сервер). В

табл. 1 приведено відповідність метрик і лічильників білінгової підсистеми вхідним даним обраної моделі. Всі значення були взяті на підсистемі обслуговування викликів тарифікації інтернет трафіку в момент найбільшої завантаженості ВНТА.

Таблиця 1. Відповідність метрик системи вхідним даним моделі

Параметр	Відповідність метрики	Одночасне значення
n	DOCS-OCS-Congestion	500
μ	DOCS-OCS-Congestion	ВНТА=403/сек
G	DOCS-OCS-Congestion	2048Mb
v_k^g	DOCS-OCS-Congestion	4Mb
V^g	DOCS-OCS-Congestion	1612Mb
s	DOCS-OCS-Congestion	500/сек
R	Визначено експертом	90%
l	DOCS-OCS-Congestion	450

Розрахунок оптимального значення інтенсивності вхідного потоку для існуючої системи. Для розрахунку оптимального значення λ проведено аналіз доступних у білінгвовій підсистемі метрик для найбільш завантаженого дня в 2017 році (24.11.2017 «Чорна п'ятниця»). Максимальне значення інтенсивності вхідного потоку було розраховано у години найбільшого навантаження, на момент, коли метрики сигналізували про відмови в обслуговуванні (REJECTS) для відомої кількості сесій. Під час аналізу, для кожного запису була розрахована інтенсивність обслуговування заявки (μ) і одночасне значення інтенсивності вхідного потоку (λ). Базуючись на отриманих даних, можна зробити висновок, що максимальному допустимому значенню інтенсивності вхідного потоку для єдиного OCS процесу, при якому не виникає деградації сервісу (відсутній REJECTS) відповідає $\lambda = 860$ при $\mu = 430$. Дані розрахунку оптимального значення λ і μ занесені в табл. 2.

Графічне відображення розрахованої інтенсивності обслуговування заявки (μ) і одночасного значення інтенсивності вхідного потоку (λ) для єдиного OCS процесу зображено на рис. 1.

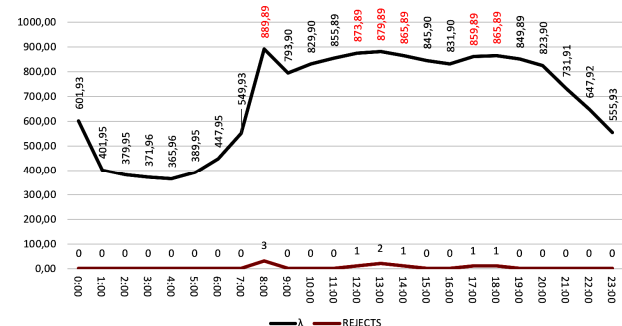


Рис. 1. Графік інтенсивності значення λ за 24.11.2017

Розрахунок оптимального значення інтенсивності вхідного потоку для системи, що масштабується. Відповідно до запропонованого розробником системи розширення фізичних компонентів, при масштабуванні системи – кількість OCS процесів,

що виконуються на одному DOCS сервері, буде збільшено у 5 разів, при цьому конфігурація OCS процесу змінена не буде. Таким чином, для системи,

що масштабується значення констант n , G , v_i^g , V_g , s , R , l , залишаться незмінними, а загальна кількість DOCS серверів буде збільшена.

Таблиця 2. Дані розрахунку оптимального значення λ і μ

DATE	TIME	GPRS1	GPRS2	REJECTS	μ	λ
24.11.2017	00:00	1211112	16102756	0	301	601.93
24.11.2017	01:00	977895	10609138	0	201	401.95
24.11.2017	02:00	962188	9984962	0	190	379.95
24.11.2017	03:00	971583	9719210	0	186	371.96
24.11.2017	04:00	973601	9570451	0	183	365.96
24.11.2017	05:00	1020312	10224994	0	195	389.95
24.11.2017	06:00	1157775	11722724	0	224	447.95
24.11.2017	07:00	1346571	14490450	0	275	549.93
24.11.2017	08:00	1749654	23858101	3	445	889.89
24.11.2017	09:00	1631822	21215782	0	397	793.90
24.11.2017	10:00	1693628	22199421	0	415	829.90
24.11.2017	11:00	1753250	22878271	0	428	855.89
24.11.2017	12:00	1817606	23379187	1	437	873.89
24.11.2017	13:00	1873052	23470265	2	440	879.89
24.11.2017	14:00	1907032	23036244	1	433	865.89
24.11.2017	15:00	1920535	22464995	1	431	861.89
24.11.2017	16:00	1945217	22005529	0	416	831.90
24.11.2017	17:00	1978970	22815321	0	430	859.89
24.11.2017	18:00	1986669	22961832	1	433	865.89
24.11.2017	19:00	1966866	22527160	0	425	849.89
24.11.2017	20:00	1958086	21745802	0	412	823.90
24.11.2017	21:00	1919809	19183564	0	366	731.91
24.11.2017	22:00	1831609	16819098	0	324	647.92
24.11.2017	23:00	1731484	14263415	0	278	555.93

Базуючись на розрахованому для такої системи значенні λ , можна розрахувати оптимальну кількість OCS процесів необхідних для підсистеми обслуговування викликів тарифікації інтернет трафіку, яка дозволить забезпечити доступність сервісів і цілісність даних, знизить вірогідність втрат і перенавантажень у системі після масштабування. Враховуючи, що один OCS процес існуючої білінгової підсистеми до масштабування, при оптимальному значенні $\lambda = 860$ здатен обробляти трафік з інтенсивністю $\mu = 430$ заявок в секунду, всіх 16 DOCS серверів з одиничним запущеним OCS процесом, оптимальна кількість трафіка, що обробляється буде дорівнювати 6880 сесій за секунду, що відповідає 24 768 000 сесіям в годину, опрацьованим всією підсистемою обслуговування викликів тарифікації інтернет трафіку.

Згідно з планами оператора мобільного зв'язку, інтенсивність вхідного потоку заявок повинна буде бути збільшеною до 50 000 000 сесій за годину. Виходячи з цього розробник білінгової системи дозволить розширити кількість OCS процесів до 30 штук зі збереженням конфігурації, що має забезпечити обробку зростаючого потоку вхідних заявок на білінгову систему. На рис. 2 зображено заплановане розширення білінгової підсистеми. Як видно, кількість DOCS серверів було зменшено до 6 штук, при цьому на кожному DOCS сервері запущено по п'ять OCS – процесів, які обробляють логіку дзвінка.

Оскільки, значення інтенсивності вхідного потоку за годину і кількість паралельно працюючих OCS процесів у новій системі відомі, розраховуємо інтенсивність обробки трафіку за секунду, окремо

на кожен процес. Використовуючи математичну модель, розраховуємо прогнозоване значення інтенсивності вхідного потоку λ . При 30 одночасно працюючих OCS процесах інтенсивність обробки трафіку за секунду буде $\mu = 463$. У табл. 3 відображено вхідні параметри для підставлення в імітаційну модель. Підставивши ці дані в імітаційну модель, отримуємо $\lambda = 925.89$, що значно перевищує рекомендоване значення ($\lambda = 860$).

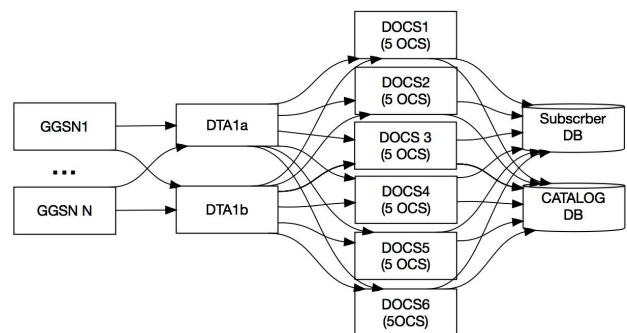


Рис. 2. Заплановане розширення білінгової підсистеми

З вищеприведеного слідує, що запропонований варіант масштабування білінгової підсистеми буде недостатнім для задоволення вимог. Більше того, фізична поломка одного DOCS сервера спричинить багатократне збільшення трафіку на DOCS серверах, які продовжать роботу, що у свою чергу, обов'язково, відобразиться на кількості неопрацьованих замовлень і може призвести до повної відмови всієї білінгової підсистеми.

Таблиця 3. Вхідні параметри для підставлення в імітаційну модель

Параметр	Значення
n	500
μ	463/сек
G	2048Mb
v_k^g	4Mb
V^g	1612Mb
s	500/сек
R	90%
l	450

Керуючись принципом надмірності при архітектурному проектуванні розширення системи, додаємо два DOCS сервера. У такому випадку загальна кількість DOCS серверів, підключених до кластеру, буде дорівнювати 8, а кількість OCS процесів буде збільшено з 30 до 40 штук.

При наявності 40 OCS процесів, інтенсивність обробки трафіку за секунду для кожного OCS процесу буде $\mu = 347$. Після підставлення отриманого значення в імітаційну модель, маємо $\lambda = 693.91$, що задовольняє розраховане рекомендоване значення ($\lambda = 860$). Навіть у випадку виходу з ладу одного DOCS сервера, прогнозоване значення інтенсивності вхідного потоку не перевищить рекомендоване значення і буде дорівнювати $\lambda = 793.90$, що перевищує відмовостійкість системи. На рис. 3 зображено покращене розширення з додаванням двох додаткових DOCS серверів.

Розрахунок номінального значення інтенсивності вхідного потоку після масштабування білінгової системи. Під час проведення робіт по масштабу-

ванню системи були враховані рекомендації по додаванню двох додаткових DOCS серверів. Білінгова. Підсистема була розширена до 8 DOCS серверів. Після переключення трафіку на нову підсистему, недоліків у роботі нової, розширеної підсистеми виявлено не було. Оператором мобільного зв'язку було прийнято рішення збільшити потік вхідних заявок до запланованої величини – орієнтовно, 50 000 000 заявок за годину. Система успішно витримала навантаження і продовжує роботу у штатному режимі. Через кілька місяців, після збільшення потоку вхідних заявок було проведено порівняльний розрахунок інтенсивності вхідного потоку λ , для підтвердження дієздатності обраного методу. Отримані дані оптимального значення λ і μ , після розширення системи, занесені у табл. 4.

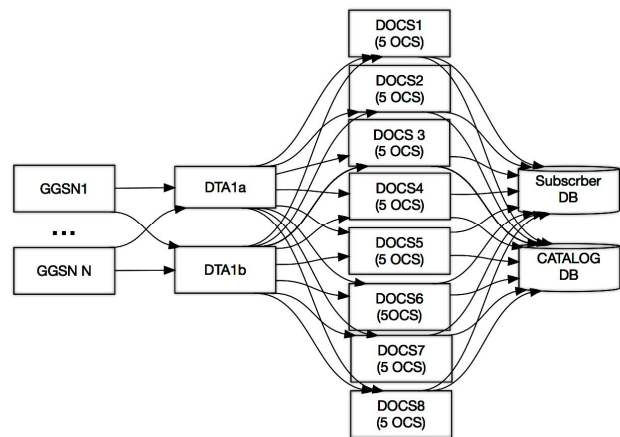


Рис. 3. Покращене розширення білінгової підсистеми

Таблиця 4. Дані порівняльного розрахунку λ і μ після розширення системи

DATE	TIME	GPRS1	GPRS2	REJECTS	μ	λ
11.04.2018	00:00	2725002	32205511	0	243	485.94
11.04.2018	01:00	2200264	21218275	0	163	325.96
11.04.2018	02:00	2164923	19969924	0	154	07.96
11.04.2018	03:00	2186062	19438419	0	150	299.96
11.04.2018	04:00	2190601	19140901	0	148	295.96
11.04.2018	05:00	2295701	20449988	0	158	315.96
11.04.2018	06:00	2604993	23445448	0	181	361.96
11.04.2018	07:00	3029785	28980900	0	222	443.95
11.04.2018	08:00	3936721	47716201	0	359	717.91
11.04.2018	09:00	3671600	42431565	0	320	639.92
11.04.2018	10:00	3810664	44398842	0	335	669.92
11.04.2018	11:00	3944812	45756542	0	345	689.92
11.04.2018	12:00	4089614	46758374	0	353	705.91
11.04.2018	13:00	4214366	46940530	0	355	709.91
11.04.2018	14:00	4290823	46072488	0	350	699.91
11.04.2018	15:00	4321204	44929989	0	342	683.92
11.04.2018	16:00	4376737	44011058	0	336	671.92
11.04.2018	17:00	4452683	44030643	0	337	673.92
11.04.2018	18:00	4470005	43737265	0	335	669.92
11.04.2018	19:00	4425450	42867923	0	328	655.92
11.04.2018	20:00	4405694	41305206	0	317	633.92
11.04.2018	21:00	4319571	38367128	0	296	591.93
11.04.2018	22:00	4121121	33638196	0	262	523.94
11.04.2018	23:00	3895840	28526830	0	225	449.95

Графічне відображення розрахованої інтенсивності обслуговування заявки (μ) і одночасного значення інтенсивності вхідного потоку (λ), для єдино-

го OCS процесу, після масштабування системи, зображено на рис. 4. Після завершення усіх необхідних розрахунків бачимо, що інтенсивність вхідного

поток не перевищує розраховане рекомендоване значення $\lambda = 860$, відмови в обслуговуванні – цілком відсутні.

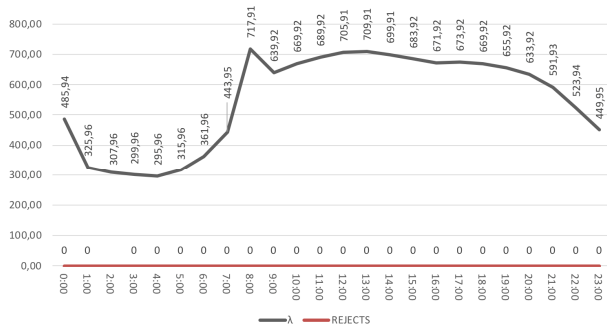


Рис. 4. Графік інтенсивності вхідного потоку (λ) за 11.04.2018

Для повноти аналізу проведемо розрахунок інтенсивності вхідного потоку так, якби рекомендоване додаткове розширення не було проведене, а загальна кількість DOCS серверів залишалась рівною шести. Отримані дані прогнозованого значення λ і μ , після розширення системи, але з неповною кількістю DOCS серверів, занесені в табл. 5.

Графічне відображення прогнозованої інтенсивності обслуговування заявки (μ) і одночасного значення інтенсивності вхідного потоку (λ), для єдиного OCS процесу, після масштабування системи, але без запропонованого додаткового розширення зображено на рис. 5. Розрахунок прогнозу показує багатократне перевищення розрахованого рекомендованого значення ($\lambda = 860$). Також за допомогою методу екстраполяції були прогнозовані відмови в обслуговуванні (REJECTS).

Таблиця 5. Дані порівняльного розрахунку λ і μ після розширення системи, при кількості DOCS серверів, рівній 6

DATE	TIME	GPRS1	GPRS2	Передбач. REJECTS	μ	λ
11.04.2018	00:00	2725001,5	32205511	0	323	645.92
11.04.2018	01:00	2200264,3	21218275	0	217	433.95
11.04.2018	02:00	2164922,5	19969924	0	205	409.95
11.04.2018	03:00	2186061,8	19438419	0	200	399.95
11.04.2018	04:00	2190601,4	19140901	0	198	395.95
11.04.2018	05:00	2295701,2	20449988	0	211	421.95
11.04.2018	06:00	2604993,3	23445448	0	241	481.94
11.04.2018	07:00	3029785,2	28980900	0	296	591.93
11.04.2018	08:00	3936721,1	47716201	100	478	955.88
11.04.2018	09:00	3671600,4	42431565	100	427	853.89
11.04.2018	10:00	3810664	44398842	300	446	891.89
11.04.2018	11:00	3944812,3	45756542	300	460	919.89
11.04.2018	12:00	4089614,1	46758374	400	471	941.88
11.04.2018	13:00	4214366	46940530	450	474	947.88
11.04.2018	14:00	4290822,9	46072488	400	466	931.88
11.04.2018	15:00	4321203,9	44929989	300	456	911.89
11.04.2018	16:00	4376737,3	44011058	300	448	895.89
11.04.2018	17:00	4452683,3	44030643	300	449	897.89
11.04.2018	18:00	4470004,5	43737265	300	446	891.89
11.04.2018	19:00	4425449,6	42867923	200	438	875.89
11.04.2018	20:00	4405693,5	41305206	0	423	845.90
11.04.2018	21:00	4319571,1	38367128	0	395	789.90
11.04.2018	22:00	4121120,9	33638196	0	350	699.91
11.04.2018	23:00	3895840	28526830	0	300	599.93

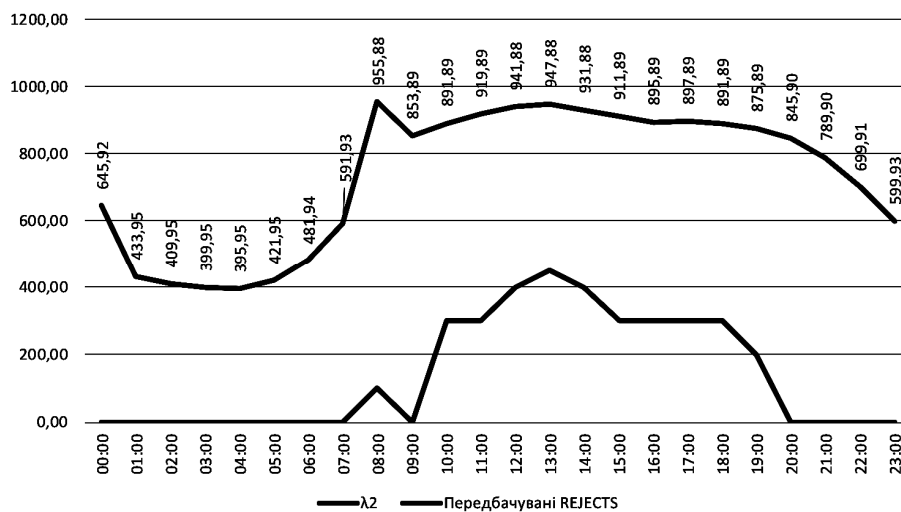


Рис. 5. Графік інтенсивності вхідного потоку (λ)

Після проведеного розширення білінгової підсистеми обслуговування викликів тарифікації, можна зробити висновок, що запропонований метод вибору обчислювальних ресурсів для обслуговування білінгових систем за умови коливання навантаження є оптимальним, початковий вибір цього методу був зроблений вірно.

Висновки

1. Запропонований метод і модель оптимального вибору обчислювальних ресурсів, для обслуговування білінгових систем за умови коливання навантаження є ефективними, у повній мірі враховують особливості архітектурних параметрів і можуть бути

застосовані у дослідженні для масштабування системи і контролю навантаження білінгової системи.

2. У ході проведення дослідження масштабування білінгової системи було виявлено, що запропонований варіант масштабування білінгової системи не здатний у повній мірі обробляти запланований до збільшення вхідний потік заявок.

3. З огляду на виявлений у ході дослідження суттєвий недолік масштабування білінгової системи, було запропоновано і реалізовано додаткове збільшення ємності DOCS серверів, що дозволило забезпечити доступність сервісів і збереження цілісності даних, підвищило відмовостійкість і знизило вірогідність перевантажень системи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Скулиш М. А., Заставенко А. А. Метод распределения ресурсов сервера оператора мобильной связи // Вісник Національного технічного університету України КПІ. Серія: Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – 2015. – №. 60.
2. Скулиш М. А. Організація роботи групи серверів для забезпечення потреб розподіленої системи тарифікації послуг // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №. 5. – С. 58-64.
3. Larisa G., Mariia S., Andriy R. Control strategy of the input stream on the online charging system in peak load moments // Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo), 2014 24th Int. Crimean Conf – IEEE, 2014. – С. 312-313.
4. Жерновий Ю.В. Імітаційне моделювання систем масового обслуговування. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2007.
5. Жерновий К. Ю., Жерновий Ю. В. Система M0/G/1 с гістерезисним перемиканням інтенсивності обслуговування. Інформаційні процеси, 2012, т. 12, No 3, стр. 176–190.
6. Жерновий К.Ю., Жерновий Ю. В. Системи M0/G/1/m і M0/G/1 з часом обслуговування, що залежить від довжини черги. – Львів: Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка // Информационные процессы, Т. 13, No 2, 2013, с. 76–90.
7. А. Н.. Однолинейные системы массового обслуживания : учебное пособие / А. Н. Соколов, Н. А. Соколов. – СПб. : Изд-во «Теледом» ГОУВПО СПбГУТ, 2010. – 112 с.
8. P. Eronen, T. Hiller, G. Zorn. RFC 4072 Diameter Extensible Authentication Protocol (EAP) Application. August 2005. — Режим доступу: <https://tools.ietf.org/html/rfc4072> — Дата доступу: 14.05.18. — IETF RFC Tools
9. Pat R. Calhoun, John Loughney, Jari Arkko, Erik Guttman, Glen Zorn. RFC 3588 Diameter Base Protocol. September 2003. — Режим доступу: <https://tools.ietf.org/html/rfc3588> — Дата доступу: 14.05.18. — IETF RFC Tools.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г. А. Кучук,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 21.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.04.2018

Исследование эффективности метода оптимального выбора вычислительных ресурсов для биллинговых систем

Ф. И. Шилов, М. А. Скулиш, А. Сафарян

Качество услуг и доход операторов мобильной связи существенно зависят от производительности и эффективности биллинговых систем, обрабатывающих потоки входящих заявок на обслуживание. Чтобы на входных интерфейсах биллинговой подсистемы не возникали очереди обрабатываемых данных, необходимо контролировать объем входящего потока, поддерживать оптимальную нагрузку и своевременно планировать расширение биллинговых подсистем, обрабатывающих такой поток. В данной статье предложена математическая модель поиска оптимальной нагрузки на систему обслуживания с ранним выявлением перегрузки, которая позволит обеспечить обслуживание с заданными показателями эффективности, а именно с заданной вероятностью обслуживания сервисов в системе онлайн тарификации. На основе статистических данных оператора связи разработана имитационная модель системы обслуживания для различных масштабов, которая показала как при превышении допустимого рассчитанного значения оптимальной нагрузки увеличивается количество отказов в обслуживании.

Ключевые слова: качество обслуживания, система онлайн тарификации, алгоритм раннего выявления перегрузок, оптимизация ресурсов сети, динамическое управление ресурсами, облачные вычисления.

Investigation of the method of computing resources optimal choice for billing systems effectiveness

F. Shilov, M. Skulysh, A. Safaryan

The quality of services and the income of mobile operators significantly depend on the performance and efficiency of billing systems that process incoming request flows. To avoid queues on the input interfaces of the billing subsystem, it is necessary to control the amount of incoming traffic, maintain the optimal load, and plan the expansion of billing subsystems processing such a flow in a timely manner. In this paper, we propose a mathematical model for finding the optimal load on a service system with an early detection of congestion, which will allow servicing with specified performance indicators, namely, with a given probability of servicing in the online charging system. On the basis of statistical simulation operator service has been designed for different load reduction, which showed the number of service failures grows in violation of the optimal load.

Keywords: QoS, OCS, RAD, network resource allocation, dynamic resource control, Cloud computing.

С. І. Шматков, Н. Г. Кучук, В. В. Донець

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ E-LEARNING З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

В статті розглядається модель інформаційної системи e-learning. **Мета статті** – розробка моделі інформаційної системи e-learning, в якій для пошуку оптимальної структури буде використано апарат генетичних алгоритмів. Базою для створення програмної моделі є математична модель інформаційних взаємозв'язків системи електронного навчання, розгорнутої на гіперконвергентному сервері. **Результати.** Представлено розроблений програмний комплекс із поясненням запуску при наявності виконавчого файлу. Наведено інтерфейс використання програми із вводом початкових даних, збереженням їх у бази даних. Для синтезу інформаційної системи e-learning було досліджено переваги та недоліки генетичного алгоритму. В результаті виведені переваги та недоліки притаманні створеному алгоритму, які також притаманні генетичним алгоритмам взагалі. **Висновки.** Розроблена програма дозволить підвищити ефективність використання базової гіперконвергентної мережі, а, отже, і підвищити якість функціонування системи e-learning в цілому. Це є необхідною складовою створення такої системи в умовах обмеженого бюджету університету.

Ключові слова: e-learning, синтез моделі, гіперконвергентна мережа, генетичний алгоритм, програмний комплекс.

Вступ

Сьогодні на рівні світового освітнього інформаційного простору поряд з сучасними тенденціями вищої школи визначилися основні напрямки вдосконалення навчальних процесів системи e-learning. Провівши аналіз існуючих технологій і розробок в електронному навчанні та перспективи технологій гіперконвергентних мереж, встановлено що у сукупності вони дають найбільше ефективне економічне рішення для університетської системи підтримки e-learning.

У [1, 2] описано математичну модель інформаційної структури системи e-learning. Для синтезу інформаційної системи e-learning було досліджено переваги та недоліки генетичного алгоритму. До суттєвої переваги генетичного алгоритму над нейронними мережами можна віднести те, що не потрібно формувати навчаючу множину та процес початкової підготовки набагато простіший [3].

Переваги запропонованого у [1] підходу при реалізації програмної моделі інформаційної системи e-learning над традиційними методами дискретної оптимізації пошуку оптимальних рішень (метод Дейкстри, метод гілок та меж, динамічне програмування [4 – 7]) є такими:

- алгоритм працює тільки із кодами, в процесі роботи код розглядається тільки як бітовий рядок (без врахування змістового сенсу);
- на кожному кроці обробляється лише декілька точок простору кодів;
- в процесі роботи алгоритм не потребує ніякої додаткової інформації, це сприяє підвищенню швидкості алгоритму;
- для формування нових точок простору використовується одночасно ймовірнісні та детерміновані методи, що дає значно більший ефект, ніж використання окремих методів.

До недоліків генетичних алгоритмів, стосовно використання для моделі, що розглядається, можна віднести те, що отримаємо раціональне, а не опти-

мальне рішення. Крім того, неможливо отримати статистичну оцінку отриманого рішення.

Після проведеного аналізу було підкреслено те, що концептуальна простота, простіше врахування апіорних знань, можливість варіювання часом пошуку раціонального рішення за допомогою зміни вимог до фітнес-функції дозволило із математичної моделі отримати модель інформаційної системи e-learning [8, 9].

Мета статті – розробка моделі інформаційної системи e-learning, в якій для пошуку оптимальної структури буде використано апарат генетичних алгоритмів.

Базою для створення програмної моделі є математична модель інформаційних взаємозв'язків системи електронного навчання, розгорнутої на гіперконвергентному сервері.

1. Інтерфейс програмного комплексу

Розроблений програмний комплекс для запуску потребує наявності віртуальної машини Java (JDK) в випадку наявності «.jar» файлу та під будь-якою платформою і в випадку наявності «.exe» файлу тільки на Windows, починаючи з 7-ої версії.

Після запуску виконавчого файлу відобразиться головний екран програми (рис. 1).

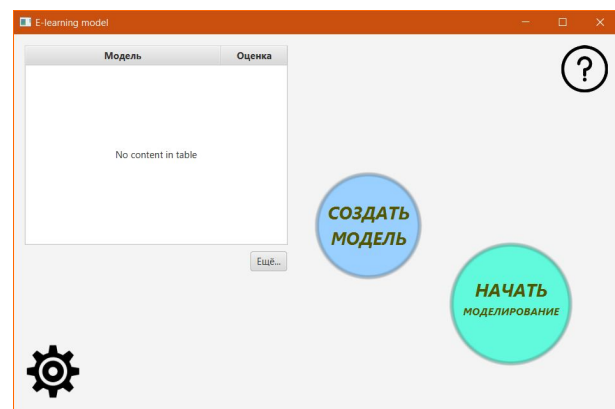


Рис. 1. Головний екран програми

Головний екран програми дозволяє користувачеві переглянути додаткову інформацію, налаштувати програму, роздивитися останні результати моделювання, ввести вхідні дані, та синтезувати модель.

Після вибору меню програмний комплекс переходить до створення моделі. Для цього користувач в декілька етапів вводить дані в програму на першому етапі (рис. 2).

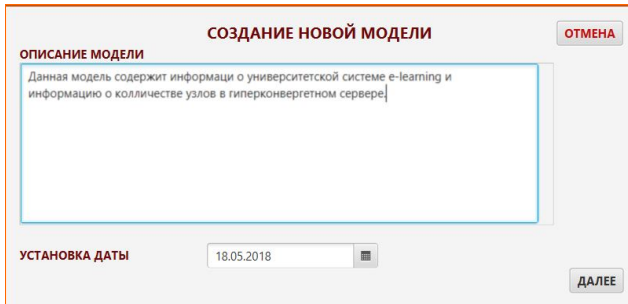


Рис. 2. Перший етап вводу даних

Далі користувач коментує нову модель, для можливості зручного відрізнення даних на другому етапі (рис. 3).

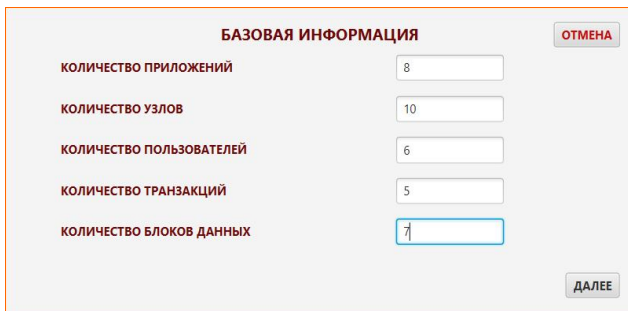


Рис. 3. Другий етап вводу даних

Другий етап – задаються параметри моделі A, N, U, E, D, котрі розглянуті у [2].

На третьому етапі роботи (рис. 4) задається інтенсивність запуску транзакцій користувачами.

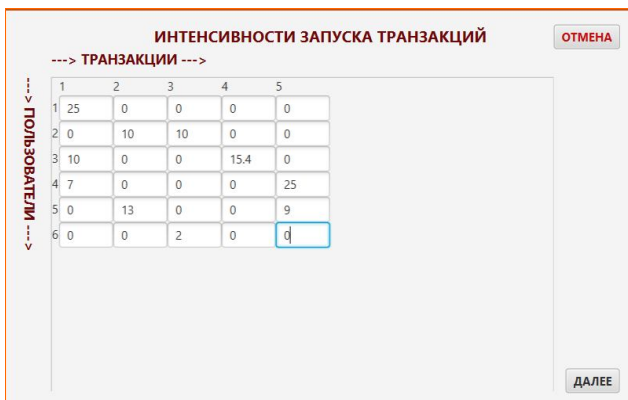


Рис. 4. Третій етап вводу даних

На четвертому етапі користувач заповнює параметри по кожній із транзакцій (рис. 5) і об'єми обміну даними (рис. 6) між прикладеннями та блоками даних.

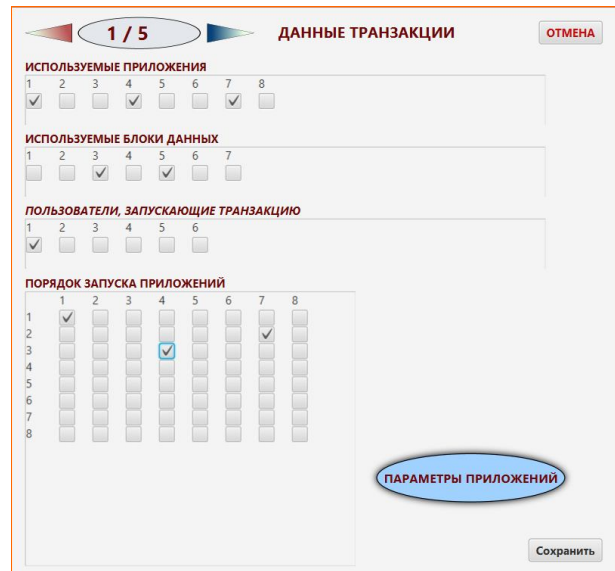


Рис. 5. Четвертий етап вводу даних, заповнення для транзакцій використання додатків та блоків даних

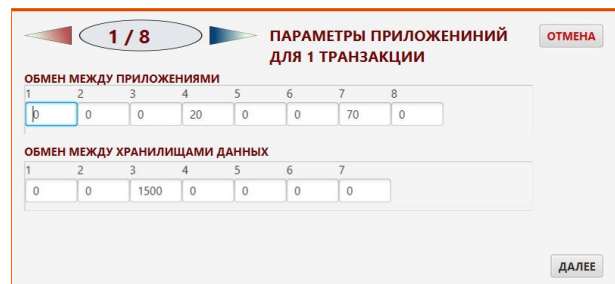


Рис. 6. Заповнення параметрів обміну даними

В процесі вводу вхідних даних програма взаємодіє з користувач кажучи про закриття (рис. 7), про не всі заповнені поля (рис. 8), про нелогічність введених даних (рис. 9).

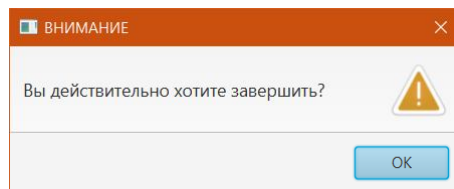


Рис. 7. Повідомлення про закінчення моделювання

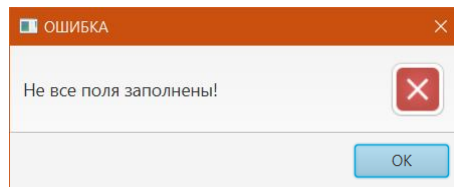


Рис. 8. Повідомлення про незаповнені поля

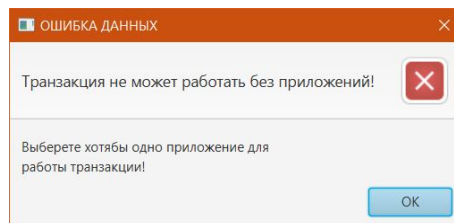


Рис. 9. Повідомлення про помилку в відповідності моделі даним, що вводить користувач

Після вибору меню можна почати моделювання. Користувачу відкривається вікно із налаштуваннями генетичного алгоритму (рис. 10). Потім, після натискання користувачем кнопки “Почати моделювання”, йому відкривається вікно із результатами синтезу (рис. 11) із можливостями або відразу зберегти, або переглянути граф інформаційної структури (рис. 12).

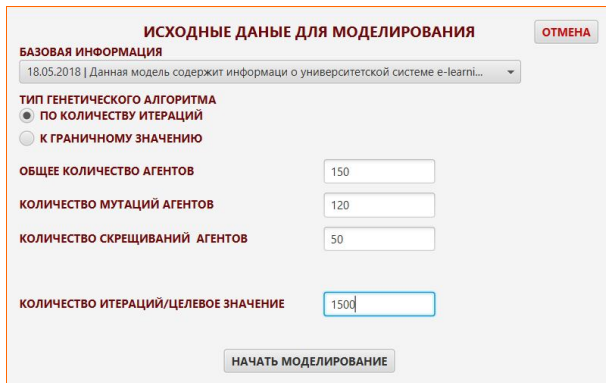


Рис. 10. Налаштування генетичного алгоритму

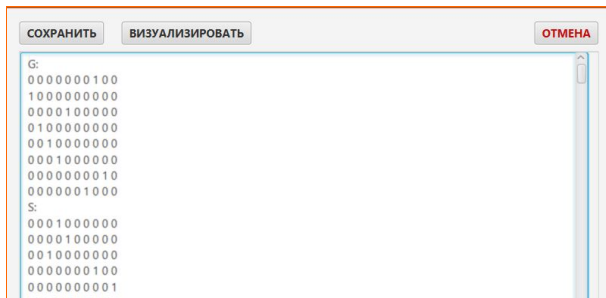


Рис. 11. Результати синтезу (роботи програми)

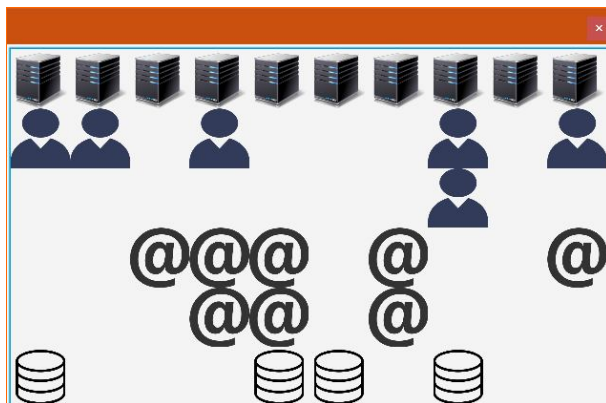


Рис. 12. Прототип графу станів

2 Особливості використання програмного комплексу

Програмна модель інформаційної структури системи e-learning дозволяє розподілити навантаження по гіперконвергентній мережі, цим самим збільшивши ефективність функціонування системи в цілому.

Недоліки, що притаманні отриманому рішення, є недоліками генетичного алгоритму:

1) рішення не гарантовано є оптимальним, воно наближено до оптимального;

2) необхідне багаторазове повторення синтезу для одної і тієї ж моделі, бо результати зазвичай випадкові й неоптимальні, також є проблеми з евристичним налагодженням алгоритму.

Наприклад, для даних $U=6, N=10, A=7, E=3, D=3$, такі результати наближені до оптимального розподілу, хоча є деякі неоптимальні розстановки блоків даних (рис. 13).

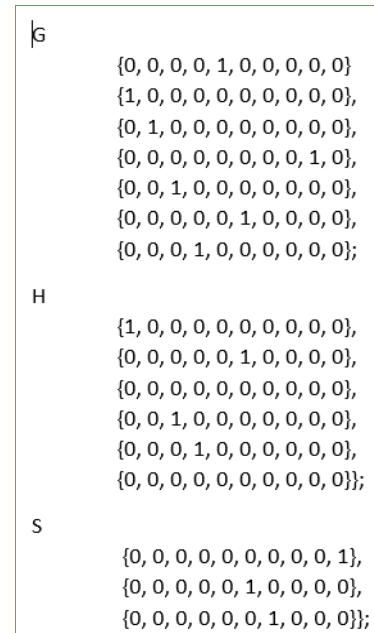


Рис. 13. Результати синтезу моделі інформаційної структури

Також модель дозволяє розрахувати і вивести для користувача об'єми даних, що передаються із сховища та циркулюють між прикладеннями, загальні об'єми даних в мережі, отримати навантаження на інформаційні вузли, середнє навантаження тощо, приклад – на рис 14.

рассчитаем работу функционирования транзакции j на информационных узлах n и m		
00001000000	0000000000	0000000000
0000000000	0000000000	00000200000
0000000000	0000000010	0000000000
0000000000	0000000000	01000000000
50000000000	0000000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000
00000000000	00100000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000

определим объемы данных передаваемых из хранилища данных:		
0000000000	0000000000	0000000000
0000000000	0000000000	00000500050
0000000000	0000000000	0000000000
0000000000	0000000000	0000000000
0000000000	0000000000	0000000000
0000010000000	0000000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000
00000000000	0000001000000	0000000000
00000000000	0000000000	0000000000

Рис. 14. Деякі параметри, що розраховує програма

Висновки

Для аналізу результатів моделі синтезу інформаційної системи e-learning було розроблено програмний комплекс, що здатен через графічний ін-

терфейс приймати від користувача вхідні дані, які характеризують склад системи e-learning із власними застосунками, блоками даних і транзакціями, що описують їх взаємодію та інформацію про склад гіперконвергентної мережі і на виході отримувати розташування користувачів, блоків даних і додатків по вузлам мережі, що являється оптимальною в

умовах даної інтенсивності запуску транзакцій користувачами. Розроблена програма дозволить підвищити ефективність використання базової гіперконвергентної мережі, а, отже, і підвищити якість функціонування системи e-learning в цілому, що являється необхідною складовою створення такої системи в умовах обмеженого бюджету університету.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Донець В. В. Development of software of e-learning information system synthesis modeling process / В. В. Донець, Н. Г. Кучук, С. І. Шматков // Сучасні інформаційні системи (Advanced Information Systems). – Х. : НТУ “ХПР”, 2018. – Т. 2, № 2.
2. Шматков С. І. Модель інформаційної структури гіперконвергентної системи підтримки електронних обчислювальних ресурсів університетської e-learning / С. І. Шматков, Н. Г. Кучук, В. В. Донець // Системи управління, навігації та зв'язку : науковий журнал. – Полтава : ПНТУ, 2018. – Вип. 2(48). – С. 97-100.
3. Шишацький А. В. Методика синтезу раціональної топології безпроводних самоорганізуючих мереж спеціального призначення з використанням генетичного алгоритму / А. В. Шишацький, Н. Г. Кучук, Є. М. Прокопенко // Системи управління, навігації та зв'язку : науковий журнал. – Полтава : ПНТУ, 2017. – Вип. 6(46). – С. 260-264.
4. Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
5. G. Kuchuk, A. Kovalenko, V. Kharchenko, A. Shamraev, "Resource-oriented approaches to implementation of traffic control technologies in safety-critical I&C systems" in book: Green IT Engineering: Components Network and Systems Implementation, Springer International Publishing, vol. 105, pp. 313-338, 2017.
6. Kuchuk G.A. An Approach To Development Of Complex Metric For Multiservice Network Security Assessment / G.A. Kuchuk, A.A. Kovalenko, A.A. Mozhaev // Statistical Methods Of Signal and Data Processing (SMSDP – 2010): Proc. Int. Conf., October 13-14, 2010. – Kiev: NAU, RED, IEEE Ukraine section joint SP, 2010. – P. 158 – 160.
7. Kuchuk G. Approaches to selection of combinatorial algorithm for optimization in network traffic control of safety-critical systems / G. Kuchuk, V. Kharchenko, A. Kovalenko, E.Ruchkov // East-West Design & Test Symposium (EWDTS). – 2016. –P. 1-6. doi : <https://doi.org/10.1109/EWDTS.2016.7807655>.
8. Semenov S. Development of graphic-analytical models for the software security testing algorithm / S. Semenov, O. Sira, N. Kuchuk // Eastern-European journal of enterprise technologies. – 2018. – № 2/4(92). – P. 39-46.
9. Merlac V. Resources Distribution Method of University e-learning on the Hyperconvergent platform / V. Merlac, S. Smatkov, N. Kuchuk, A. Nechausov // Conference Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Service and Technologies. DESSERT'2018. Ukraine, Kyiv, May 24-27, 2018. – P. 136-140.

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. С. Г. Семенов,

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків

Received (Надійшла) 9.04.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

Анализ результатов синтеза модели информационной системы e-learning

В. В. Донець, Н. Г. Кучук, С. И. Шматков

В статье рассматривается модель информационной системы e-learning. **Цель статьи** - разработка модели информационной системы e-learning, в которой для поиска оптимальной структуры будет использован аппарат генетических алгоритмов. Базой для создания программной модели служит математическая модель информационных взаимосвязей системы электронного обучения развернутой на гиперконвергентном сервере. **Результаты.** Представлен разработанный программный комплекс с объяснением запуска при наличии исполняемого файла и интерфейс использования программы с соответствующими изображениями. Также предоставлено типичный алгоритм использования программы с вводом исходных данных сохранением их в базу данных и синтезом модели. Для синтеза информационной системы e-learning были исследованы преимущества и недостатки генетического алгоритма. **Выводы.** Разработанная программа позволит повысить эффективность использования базовой гиперконвергентной сети, а, следовательно, и повысить качество функционирования системы e-learning в целом. Это является необходимой составляющей создания такой системы в условиях ограниченного бюджета университета.

Ключевые слова: e-learning, синтез модели, гиперконвергентная сеть, генетический алгоритм, программный комплекс.

E-learning information system modeling with using genetic algorithms

V. Donets, N. Kuchuk, S. Shmatkov

The article describes the model of the synthesis of the e-learning information system. **The purpose of the paper** is to develop a model of the e-learning information system, in which a genetic algorithm apparatus will be used to find the optimal structure. The basis for the creation of which was the mathematical model of information interconnections of the e-learning system. **Results.** The mathematical model is deployed on a hyperconverging server. The developed software complex is presented. With an explanation of the startup if there is an executable file. The interface of using the program with the corresponding images is presented. A typical algorithm for using the program is also shown. In it input of initial data with their preservation in the database and synthesis of the model. The advantages and disadvantages of the genetic algorithm were studied. **Conclusions.** The developed program will improve the efficiency of using the basic hyperconverging network, and, consequently, improve the quality of the functioning of the e-learning system as a whole. This is a necessary component of the creation of such a system under the conditions of a limited budget of the university.

Keywords: e-learning, model synthesis, hyperconvergent network, genetic algorithm, program complex.

Л.М. Зіменко

Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна

МЕТОД ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЖИВУЧОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ НАДБУДОВИ З ЦЕНТРАЛІЗОВАНИМ ПРИНЦИПОМ УПРАВЛІННЯ НАДАННЯМ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СЕРВІСІВ

Предметом вивчення в статті є процес визначення та підвищення функціональної живучості інтелектуальної надбудови (ІН) з централізованим принципом управління (ЦПУ) наданням інтелектуальних сервісів (ІС). Метою є розробка методу забезпечення функціональної живучості ІН з ЦПУ наданням ІС. **Завдання:** 1) визначити етапи надання ІС для визначення функціональної живучості ІН з ЦПУ; 2) визначити метод підвищення функціональної живучості для ІН з ЦПУ наданням ІС. Отримано такі **результати**. Введено поняття множини функцій системи, множини функціональних елементів: множини функціональних ресурсів системи, множини функціональних зв'язків між ресурсами, класи інтелектуальних послуг, маршрут, який представляє процес надання інтелектуальних сервісів визначеного класу. Метод полягає у визначенні умовних ймовірностей подій, що складаються в несприятливому впливі (НВ) на рівень функціональних ресурсів та функціональних зв'язків ІН, визначенні маршрутів реалізації процесу надання ІС заданого класу, визначенні умовних ймовірностей ураження елементів усіх рівнів функціональних ресурсів і функціональних зв'язків. На основі отриманих значень даних ймовірностей здійснюється визначення показника функціональної живучості, забезпечення потрібного значення якого досягається застосуванням процедури оптимізації структури резервів функціональних елементів. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: вперше розроблено метод забезпечення функціональної живучості ІН з ЦПУ наданням ІС.

Ключові слова: функціональна живучість; несприятливий вплив; маршрут; клас інтелектуальних сервісів; функціональні ресурси; функціональні зв'язки; резервування.

Вступ

Живучість є однією з найважливіших властивостей телекомунікаційних мереж (ТКМ), зокрема, мереж нового покоління NGN, що забезпечує їх ефективне функціонування. При цьому питання забезпечення і підвищення живучості NGN стають все більш актуальними у зв'язку з інтенсивним розвитком телекомунікацій і мультисервісних мереж. Стосовно до NGN в документах ITU [1] рекомендується, щоб проектування, експлуатація та розвиток NGN здійснювалися із забезпеченням надійності, безпеки, а також живучості, що визначає можливість системи своєчасно виконувати своє призначення – забезпечувати виконання критичної підмножини функцій для досягнення мети функціонування, а також прийнятний рівень обслуговування, навіть якщо нормальна експлуатація мережі ускладнюється різними зовнішніми НВ.

Під функціональною живучістю ТКМ розуміють властивість, що характеризує здатність мережі ефективно виконувати задані функції при отриманні пошкоджень (руйнувань) внаслідок деяких НВ або відновлювати цю здатність протягом заданого часу [2, 3].

У розробку питань визначення функціональної живучості систем різного призначення істотний внесок внесли роботи Ю.Ю. Громова [4], О.Г. Доднова і Д.В. Ланде [2], Ю.І. Стекольнікова [3], Д.О. Кривошеї [5], Н.О. Князевої [6, 7] та ін. Слід зазначити, що на даному етапі розвитку теорії живучості поки не склалися умови, що дозволяють сформулювати і реалізувати єдиний підхід до розробки завдань оптимізації різних видів живучості для різних типів систем. Проте, сформульовано

принципи, керівництво якими призводить до позитивного ефекту в справі забезпечення живучості систем різного призначення [3].

У той же час слід зазначити, що завдання оцінки, забезпечення та підвищення функціональної живучості інтелектуальної надбудови в науковій літературі розглядаються недостатньо, незважаючи на активний розвиток інтелектуальних сервісів і необхідності в зв'язку з цим виконання певних вимог до якості сервісу.

Метою статті є розробка методу забезпечення функціональної живучості інтелектуальної надбудови з централізованим принципом управління наданням інтелектуальних сервісів.

Основна частина

У даній роботі запропоновано метод визначення функціональної живучості інтелектуальної надбудови з централізованим принципом управління, що здійснює управління процесом надання інтелектуальних сервісів.

При аналізі функціональної живучості систем різного призначення розглядаються наступні характеристики системи: мета функціонування, множина завдань, на вирішення яких система орієнтована, і множина ресурсів, які використовуються в процесі вирішення завдань [2].

Визначимо характеристики системи управління – ІН.

Мета функціонування – надання ІС.

Множина завдань (функцій системи) – управління процесом надання ІС.

Множина ресурсів – множина функціональних елементів, які використовуються в процесі надання ІС.

Для забезпечення мети функціонування систем зазвичай застосовують одну із стратегій: забезпечення відмовостійкості – f -стратегію (fault-tolerance), або забезпечення живучості – s -стратегію (survivability).

При формуванні s -стратегії слід визначити множину станів системи, в кожному з яких здійснюється процес управління наданням ІС q -го класу (IC_q) ($q = \overline{1, Q}$, Q – кількість станів системи (видів ІС)).

Інтелектуальна надбудова з ЦПУ має у своїй структурі програмні комутатори Softswitch, з'єднані між собою, та сервер (ІН з ЦПУ).

При інтелектуальній надбудові з ЦПУ (рис. 1), у разі неможливості обробки заявки на ІС одним з Softswitch, заявка надходить далі на обробку до іншого Softswitch, поки не буде оброблена і передана на сервер сервісів.

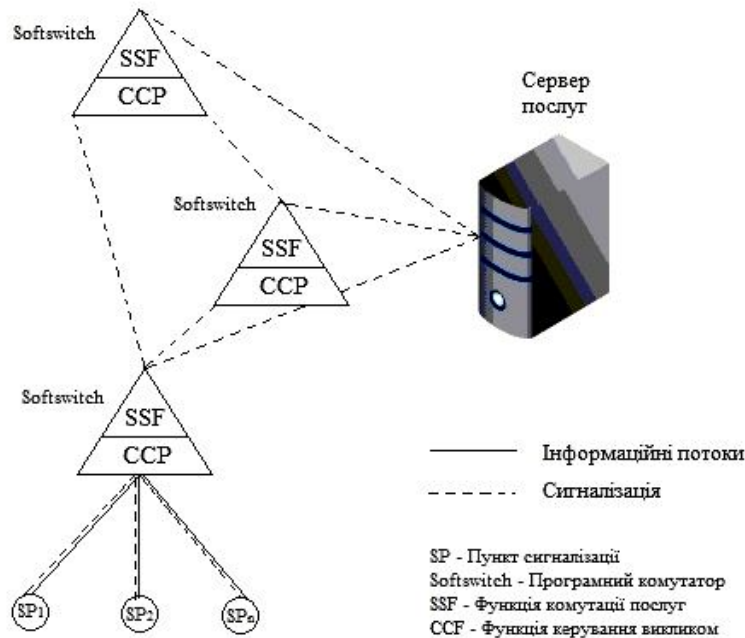


Рис. 1. Інтелектуальна надбудова з ЦПУ

Для визначення функціональної живучості ІН введемо показник функціональної живучості – ймовірність виконання системою (ІН) заданої функції – надання сервісів q -го класу. Значення цього показника залежить від ймовірності настання НВ – $P(E_{НВ})$.

Структура ІН з ЦПУ, що забезпечує надання ІС будь-якого класу може бути представлена у вигляді графа (рис. 2):

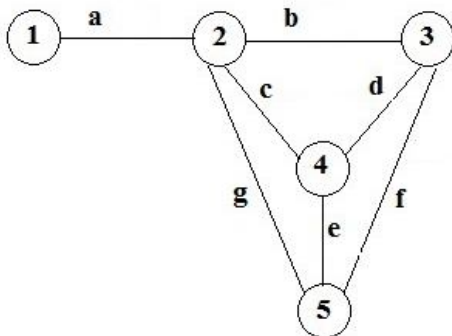


Рис. 2. Граф мережі ІН з ЦПУ

Процес надання ІС при ІН з ЦПУ представимо у вигляді ієрархічної системи (рис. 3).

На кожному ярусі з непарною нумерацією розташовані пункти (вершини графа, що використову-

ють відповідні ресурси – SP, Softswitch, SSF, CCF (рис. 1)), з парної – гілки графа – функціональні зв'язки між ресурсами системи.

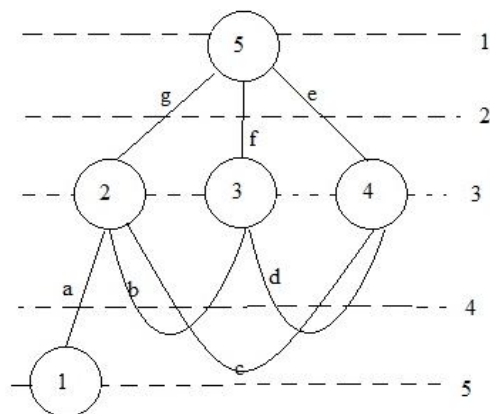


Рис. 3. Яруси ієрархічної системи при ІН з ЦПУ

Ймовірність настання НВ – $P(E_{НВ})$ – може бути як завгодно малою, однак, завжди $P(E_{НВ}) > 0$.

Метод забезпечення функціональної живучості інтелектуальної надбудови з централізованим принципом управління наданням інтелектуальних сервісів. Запропонований метод визначення функціональної живучості ІН з централізованим

принципом управління представляється наступними етапами.

I. Розрахунок умовних ймовірностей подій, що складаються в несприятливій дії на рівень l_r пунктів системи $P(E_{l_r})$ (1) і рівень l_y функціональних зав'язків $P(E_{l_y})$ (2).

Цей розрахунок здійснюється виходячи з гіпотези про рівноуразливість всіх рівнів системи:

$$P_{l_{ri}}^q = \frac{l_r(g_{l_{ri}}^q)}{l_r(g_{l_r}^q)} \cdot \frac{l_r(g_{l_r}^q)}{g_{l_r}} \cdot \frac{L_r}{L_r + L_y} \cdot P(E_{HB}), \quad (1)$$

$$P_{l_{yi}}^q = \frac{l_y(g_{l_{yi}}^q)}{l_y(g_{l_y}^q)} \cdot \frac{l_y(g_{l_y}^q)}{g_{l_y}} \cdot \frac{L_y}{L_r + L_y} \cdot P(E_{HB}), \quad (2)$$

де $P_{l_r}^q$ і $P_{l_y}^q$ – ймовірності ураження елементів рівнів l_r і l_y ;

$l_r(g_{l_r}^q)$, $l_y(g_{l_y}^q)$ – кількість видів функціональних ресурсів і функціональних зав'язків відповідно;

L_r – кількість рівнів пунктів (функціональних ресурсів);

L_y – кількість рівнів (функціональних зав'язків).

II. Обчислення умовних ймовірностей впливу НВ на рівні системи:

– для пунктів (функціональних ресурсів):

$$P(E_{l_r}) = P(E_{HB}) \cdot \frac{L_r}{L_r + L_y}; \quad (3)$$

– для гілок (функціональних зв'язків):

$$P(E_{l_y}) = P(E_{HB}) \cdot \frac{L_y}{L_r + L_y}. \quad (4)$$

III. Визначення маршрутів реалізації процесу надання інтелектуальних сервісів заданого класу як послідовностей використовуваних функціональних ресурсів і функціональних зв'язків у вигляді диз'юнктивної нормальної форми (кожен маршрут множини маршрутів надається кон'юнкцією використовуваних функціональних ресурсів і функціональних зв'язків, а об'єднання маршрутів у множину здійснюється використанням операції диз'юнкції) [6, 8].

IV. Визначення кількості функціональних ресурсів і функціональних зв'язків, що використовується для кожного маршруту.

V. Визначення умовних ймовірностей ураження елементів усіх рівнів функціональних ресурсів і функціональних зв'язків.

VI. Визначення показника функціональної живучості $P_{f_{qi}}^*$ P_{IH}^f – ймовірності виконання інтелектуальної надбудови з централізованим принципом

управління сервісів q -го класу (5):

$$P_{f_{qi}}^* = 1 - (P\{E_1\} + P\{E_2\} - P\{E_1 \cap E_2\}). \quad (5)$$

де E_1 – відмова функціональних ресурсів рівня l_r (1),

E_2 – відмова функціональних зав'язків рівня l_y (2).

VII. Визначення виконання умови (6), а саме: показник функціональної живучості P_{IH}^f ІН, отриманий після розрахунків по формулі (5), порівнюється з необхідним значенням функціональної живучості $P_{НЕОБХ}^f$.

$$P_{IH}^f \geq P_{НЕОБХ}^f, \quad (6)$$

Виконання умови (6) означає, що отриманий показник функціональної живучості задовольняє існуючим вимогам. При цьому здійснюється перехід до етапу K – завершення роботи. При невиконанні умови (5) здійснюється перехід до наступного етапу – VIII.

VIII. Забезпечення потрібного рівня функціональної живучості.

Ця процедура здійснюється визначенням тих функціональних ресурсів та функціональних зв'язків усіх рівнів, які в найбільшій мірі впливають на значення показника функціональної живучості, та формування відповідної структури резерву.

Відповідна система резервування створюється наступним чином. Система складається з n ділянок мережі та в жодній з ділянок немає резервних елементів.

На першому кроці процесу знаходиться така ділянка, яка дає найбільший «питомий» вигреш в прирості показника функціональної живучості системи в цілому при додаванні одного резервного елемента до неї.

На другому кроці відшукується наступна ділянка (включаючи і ту, до якої тільки що був приєднаний резервний елемент), додавання до якої одного резервного елемента дає знову найбільше відносне збільшення показника функціональної живучості системи в цілому.

Система резервування будується доти, поки не буде досягнуто виконання умови (6). Після чого здійснюється перехід до етапу K .

Ефективність резервування ділянки оцінюється на основі формули (7), що використовується для розрахунку для кожної i -ої ділянки при збільшенні кратності її резервування на одиницю [8]:

$$\gamma_f(m_i + 1) = \frac{p_i(m_i + 1) - p_i m_i}{c_i \cdot p_i(m_i)}, \quad (7)$$

де $p_i(m_i + 1)$, $p_i(m_i)$ – значення показника ймовірності неураження i -ої ділянки при кратності резервування $(m_i + 1)$ та m_i , відповідно;

c_i – вартість i -ої резервної ділянки системи.

Враховуючи вплив процесу резервування на зміну значень P_{f_q} , який здійснюється відповідно розрахункам за виразом (8) ($\gamma_f(m_i + 1)$ – розраховується для множин функціональних елементів – функціональних ресурсів та функціональних зв'язків), визначається можливість резервування кожної ділянки.

K – завершення роботи методу.

Продемонструємо застосування методу на такому прикладі.

Нехай $P(E_{HB}) = 0,01$.

Обчислимо умовну ймовірність впливу на рівні системи:

– для пунктів (функціональних елементів):

$$P(E_{l_r}) = 0,01 \cdot \frac{3}{3+2} = 0,006;$$

– для гілок (функціональних зв'язків):

$$P(E_{l_y}) = 0,01 \cdot \frac{2}{3+2} = 0,004.$$

Вважаємо відомими кількість видів ресурсів $l_r(g_r^q)$ і функціональних зв'язків $l_y(g_y^q)$, які використовуються для надання ІС q -го класу, які перебувають на рівнях l_r і l_y , відповідно.

Маємо для ІС q -го класу множину маршрутів:

$$m_{15} = ag + abf + ace + abde + acdf. \quad (8)$$

Визначимо, яка кількість функціональних елементів використовується для кожного маршруту.

Для маршруту ag :

Для пунктів:

- рівень 1 – один функціональний ресурс;
- рівень 3 – один функціональний ресурс;
- рівень 5 – один функціональний ресурс.

Для гілок:

Рівень 2 – один функціональний зв'язок; рівень 4 – один функціональний зв'язок.

Для маршруту abf :

Для пунктів:

- рівень 1 – один функціональний ресурс;
- рівень 3 – два функціональні ресурси;
- рівень 5 – один функціональний ресурс.

Для гілок:

- рівень 2 – один функціональний зв'язок;
- рівень 4 – два функціональних зв'язок.

Для інших маршрутів кількість ресурсів розраховується аналогічно.

Як бачимо, для виконання усіх інтелектуальних сервісів q -го класу у відповідності з маршрутами (8) використовуються такі функціональні елементи:

- функціональні ресурси:
рівень 1 – один ресурс;

рівень 3 – три ресурси;

рівень 5 – один ресурс.

– функціональні зв'язки:

рівень 2 – три функціональні зв'язки;

рівень 4 – чотири функціональні зв'язки.

Визначимо умовні ймовірності ураження елементів рівнів l_r і l_y – $P_{l_r}^q$ і $P_{l_y}^q$.

Для рівнів функціональних ресурсів:

$$\text{Рівень 1: } P_{l_1}^q = \frac{1}{1} \cdot 0,006 = 0,006.$$

$$\text{Рівень 3: } P_{l_3}^q = \frac{3}{3} \cdot 0,006 = 0,006.$$

$$\text{Рівень 5: } P_{l_5}^q = \frac{1}{1} \cdot 0,006 = 0,006.$$

Для рівнів функціональних зв'язків:

$$\text{Рівень 2: } P_{l_2}^q = \frac{3}{3} \cdot 0,004 = 0,004.$$

$$\text{Рівень 4: } P_{l_4}^q = \frac{4}{4} \cdot 0,004 = 0,004.$$

Показник функціональної живучості $P_{\text{ІІ}}^f$ інтелектуальної надбудови, отриманий після розрахунків по формулі (5), порівнюється з необхідним значенням функціональної живучості $P_{\text{НЕОБХ}}^f$ (формула (6)).

Визначимо, за якими маршрутами сервіс надається.

Маємо спільну множину маршрутів (8). Нехай q -й клас сервісів становить три сервіси.

Для сервісу 1 використовуються маршрути:

$$\mu_{15}^1 = ag + ace.$$

Для сервісу 2 використовуються маршрути:

$$\mu_{15}^2 = abf + abde.$$

Для сервісу 3 використовуються маршрути:

$$\mu_{15}^3 = acdf.$$

На основі проведених розрахунків для множини ІС q -го класу отримаємо для сервісу 1:

– використані функціональні ресурси:

рівень 1 – один ресурс;

рівень 3 – два ресурси;

рівень 5 – один ресурс;

– використані функціональні зв'язки:

рівень 2 – два функціональних зв'язки;

рівень 4 – два функціональних зв'язки.

Для інших сервісів розрахунки проводяться аналогічно.

Визначимо ймовірність ураження елементів рівнів l_r і l_y , використаних при наданні i -го сервісу q -го класу.

Для сервісу 1:
– рівні ресурсів:

$$\text{Рівень 1: } P_{l_{11}}^q = \frac{1}{1} \cdot 0,006 = 0,006.$$

$$\text{Рівень 3: } P_{l_{31}}^q = \frac{2}{3} \cdot 0,006 = 0,004.$$

$$\text{Рівень 5: } P_{l_{51}}^q = \frac{1}{1} \cdot 0,006.$$

– рівні функціональних зав'язків:

$$\text{Рівень 2: } P_{l_{21}}^q = \frac{2}{3} \cdot 0,004 = 0,016.$$

$$\text{Рівень 4: } P_{l_{41}}^q = \frac{2}{4} \cdot 0,004 = 0,002.$$

Для інших сервісів розрахунки ведуться аналогічно. Нехай необхідно забезпечити рівень функціональної живучості ПН:

$$P_{\text{НЕОБХ}}^f = 0,99.$$

Розглянемо наступні випадки надання сервісу: коли надання сервісу відбувається за кількома маршрутами і коли надання сервісу відбувається по одному маршруту.

1. Надання сервісу за кількома маршрутами, коли будь-який з маршрутів може бути використаний.

В цьому випадку шукана ймовірність надання даного сервісу визначається наступним чином.

Розрахуємо ймовірність надання сервісу 1. Для даного сервісу використовується такий маршрут:

$$\mu_{15}^1 = ag + ace.$$

Розрахуємо ймовірність неуразнення шляхів $\mu_1 = ag$ і $\mu_2 = ace$.

Розпишемо цей маршрут у вигляді двох різних ланцюжків з'єднання послідовних елементів на різних рівнях: Перший ланцюжок має такий вигляд:

$$(1)R_5 - (a)Y_4 - (2)R_3 - (g)Y_2 - (5)R_1.$$

$$P_{\mu_1} = (1 - P_{l_{51}}^q)(1 - P_{l_{41}}^q)(1 - P_{l_{31}}^q)(1 - P_{l_{21}}^q) \times \\ \times (1 - P_{l_{11}}^q) = (1 - 0,006)(1 - 0,004) \times \\ \times (1 - 0,004)(1 - 0,00267)(1 - 0,006) = 0,97753.$$

Другий ланцюжок виглядає так:

$$(1)R_5 - (a)Y_4 - (2)R_3 - (c)Y_4 - \\ - (4)R_3 - (e)Y_2 - (5)R_1.$$

$$P_{\mu_2} = (1 - P_{l_{51}}^q)(1 - P_{l_{41}}^q)(1 - P_{l_{31}}^q)(1 - P_{l_{41}}^q) \times \\ \times (1 - P_{l_{31}}^q)(1 - P_{l_{22}}^q)(1 - P_{l_{12}}^q) = \\ = (1 - 0,006)(1 - 0,002)(1 - 0,004)(1 - 0,004) \times \\ \times (1 - 0,004)(1 - 0,00267)(1 - 0,006) = 0,97167.$$

Розрахуємо ймовірність $P_{f_{q1}}$ надання сервісу

як результуючу ймовірність відповідно до виразу (5), при паралельному з'єднанні маршрутів:

$$P_{f_{q1}} = 1 - (1 - 0,97753)(1 - 0,97167) = 0,99936.$$

Отриманий показник функціональної живучості забезпечує виконання умови (6), тобто $0,99936 > 0,99$.

Розрахуємо ймовірність надання сервісу 2. Для даного сервісу використовується такий маршрут:

$$\mu_{15}^2 = abf + abde.$$

Розрахуємо ймовірність неуразнення шляхів $\mu_1 = abf$ і $\mu_2 = abde$.

Розпишемо цей маршрут у вигляді двох різних ланцюжків з'єднання послідовних елементів на різних рівнях.

Перший ланцюжок має такий вигляд:

$$(1)R_5 - (a)Y_4 - (2)R_3 - (b)Y_4 - (3)R_3 - \\ - (f)Y_2 - (5)R_1.$$

Другий ланцюжок виглядає так:

$$(1)R_5 - (a)Y_4 - (2)R_3 - (b)Y_4 - (3)R_3 - (d)Y_4 - \\ - (4)R_3 - (e)Y_2 - (5)R_1,$$

де (1) R_5 , (2) R_3 , (3) R_3 , (3) R_4 , (5) R_1 – функціональні елементи відповідно до номерів ярусів, на яких вони розташовані;

(a) Y_4 , (b) Y_4 , (f) Y_4 , (d) Y_4 , (e) Y_2 – функціональні зв'язки відповідно до номерів ярусів, на яких вони розташовані;

$$P_{\mu_1} = (1 - P_{l_{52}}^q)(1 - P_{l_{42}}^q)(1 - P_{l_{32}}^q)(1 - P_{l_{42}}^q) \times \\ \times (1 - P_{l_{32}}^q)(1 - P_{l_{22}}^q)(1 - P_{l_{12}}^q) = \\ = (1 - 0,006)(1 - 0,003)(1 - 0,006)(1 - 0,003) \times \\ \times (1 - 0,006)(1 - 0,00267)(1 - 0,006) = 0,96778;$$

$$P_{\mu_2} = (1 - P_{l_{52}}^q)(1 - P_{l_{42}}^q)(1 - P_{l_{32}}^q)(1 - P_{l_{42}}^q) \times \\ \times (1 - P_{l_{32}}^q)(1 - P_{l_{42}}^q)(1 - P_{l_{32}}^q)(1 - P_{l_{22}}^q)(1 - P_{l_{12}}^q) = \\ = (1 - 0,006)(1 - 0,003)(1 - 0,006)(1 - 0,003) \times \\ \times (1 - 0,006)(1 - 0,003)(1 - 0,006)(1 - 0,00267) \times \\ \times (1 - 0,006) = 0,95908.$$

Розрахуємо ймовірність $P_{f_{q2}}$ надання сервісу

як результуючу ймовірність відповідно до виразу (5), при паралельному з'єднанні маршрутів:

$$P_{f_{q2}} = 1 - (1 - 0,96777)(1 - 0,95908) = 0,99868.$$

Отриманий показник функціональної живучості забезпечує виконання (6), тобто, $0,99868 > 0,99$.

Можна зробити висновок, що надання сервісу по декількох маршрутах задовольняє заданим вимогам по функціональній живучості.

2. Розглянемо випадок надання сервісу по одному маршруту.

Для забезпечення надання хоча б одного сервісу необхідно, щоб всі елементи маршруту, що забезпечує даний сервіс, не були вражені в результаті НВ, тобто ймовірність надання сервісу визначається як добуток ймовірностей неураження всіх елементів маршруту, що забезпечують даний сервіс.

Розрахуємо дану ймовірність для сервісу 3.

Маємо ймовірності ураження елементів, що становлять маршрут надання сервісу 3: $\mu_{15}^3 = acdf$.

Розпишемо цей маршрут у вигляді ланцюжка з'єднання послідовних елементів на різних рівнях:

$$(1)R_5 - (a)Y_4 - (2)R_3 - (c)Y_4 - (4)R_3 - (d)Y_4 - (3)R_3 - (f)Y_2 - (5)R_1.$$

Для забезпечення надання даного сервісу необхідно, щоб всі елементи даного маршруту були неуражені в результаті НВ.

Неураження кожного з елементів маршруту визначається як ймовірність протилежної події щодо

ймовірності ураження, а ймовірність функціонування маршруту – як помноження ймовірностей неураження всіх елементів маршруту $acdf$:

$$P_{f_{q3}} = (1 - p_{l_{53}}^q)(1 - p_{l_{43}}^q)(1 - p_{l_{33}}^q)(1 - p_{l_{43}}^q) \times \\ \times (1 - p_{l_{33}}^q)(1 - p_{l_{43}}^q)(1 - p_{l_{33}}^q)(1 - p_{l_{23}}^q) \times \\ \times (1 - p_{l_{13}}^q) = (1 - 0,006)(1 - 0,003)(1 - 0,006) \times \\ \times (1 - 0,003)(1 - 0,006)(1 - 0,003)(1 - 0,006) \times \\ \times (1 - 0,0033)(1 - 0,006) = 0,95848.$$

Отриманий показник функціональної живучості не забезпечує виконання умови (6), а саме, $0,95848 < 0,99$.

Тому необхідно перейти до процедури підвищення функціональної живучості для заданої ділянки мережі.

Підвищення функціональної живучості здійснюється наступним чином.

Вихідні дані – вартість резервного обладнання (в умовних одиницях) і ймовірності неураження елементів і ділянок маршруту при НВ – наведені у табл. 1.

Таблиця 1. Вихідні дані ІІІ

	Функціональний елемент					Функціональний зв'язок			
	1	2	3	4	5	a	c	d	f
Вартість (у.о.)	2	1	1	2	1	1	1	2	2
Ймовірність неураження	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,997	0,997	0,997	0,9967

В результаті проведених розрахунків на першому етапі формується сукупність значень показників неураження елементів маршрутів, які представ-

лені в табл. 2. У стовпці 1 зазначено номер кроку. У стовпці 2 вказано номер функціонального елемента або функціонального зв'язку.

Таблиця 2. Результати розрахунків резервування ділянок у ІІІ з ЦПУ

№ кроку	Функціональний ресурс або функціональний зв'язок	$P_{f_{q3}}$	$c_{f_{q3}}$	$\gamma_f(m_i + 1)$
1	2	3	4	5
0		0,95848	0	0
1				
	1	0,96423	2	0,003
	2	0,96423	1	0,006
	3	0,96423	1	0,006
	4	0,96423	2	0,003
	5	0,96423	1	0,006
	a	0,96136	1	0,003
	c	0,96136	1	0,003
	d	0,96136	2	0,00015
	f	0,96164	2	0,00017

У стовпці 3 вказані значення функціональної живучості P_{fq3} .

У стовпці 4 вказані значення вартості резервного обладнання, в стовпці 5 – показник $\gamma_f(m_i + 1)$, отриманий на основі формули (7), максимальне значення якого і визначає вибір ділянки для резервування.

В результаті виконання кроку 1 резервне обладнання слід ввести на ділянці «2». Отримане на цьому кроці значення

$$P_{IH}^f = 0,96423 < P_{НЕОБХ}^f = 0,99.$$

Отже, процес резервування необхідно продовжити. Результати наступних розрахунків наведені в табл. 3.

Таблиця 3. Послідовність кроків забезпечення функціональної живучості системи у ІН з ЦПУ

№ кроку	Функціональний ресурс або функціональний зв'язок	P_{fq3}	c_{fq3}	$\gamma_f(m_i + 1)$
1	2	0,96423	1	0,006
2	3	0,97005	1+1	0,006
3	5	0,97587	1+1+1	0,006
4	1	0,98172	3+2	0,003

В результаті сформовано вектор оптимальної структури резерву:

$$M(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_a, m_c, m_d, m_f) = (1, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0).$$

Це означає, що слід додати по одному резервному елементу до ділянок 1, 2, 3, 4, 5, що забезпечує значення показника функціональної живучості

$$P_{IH}^f = 0,99970 > P_{НЕОБХ} = 0,99,$$

а мінімально можлива вартість резервного обладнання становить

$$C = 5 \text{ у.о.}$$

Висновки

В роботі запропонований метод забезпечення функціональної живучості інтелектуальної надбудови, який здійснює забезпечення централізованим управлінням процесом надання інтелектуальних сервісів. Введено поняття множини функції системи, множини функціональних елементів: множини функціональних ресурсів системи, множини функ-

ціональних зв'язків між ресурсами, класи інтелектуальних послуг, маршрут, який представляє процес надання інтелектуальних сервісів визначеного класу.

Метод складається з визначення умовних ймовірностей подій, несприятливих впливів на рівень функціональних ресурсів та функціональних зв'язків ІН, визначенні маршрутів реалізації процесу надання ІС заданого класу, визначенні умовних ймовірностей ураження елементів усіх рівнів функціональних ресурсів і функціональних зв'язків.

На основі отриманих значень даних ймовірностей здійснюється визначення показника функціональної живучості, забезпечення потрібного значення якого досягається застосуванням процедури оптимізації структури резерву функціональних елементів. Наведено приклад застосування розробленого методу, який показав працездатність методу.

Запропонований метод може бути використаний при проектуванні системи управління інтелектуальними послугами, при виборі принципу управління, при вирішенні завдань підвищення функціональної живучості системи управління інтелектуальними послугами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рекомендация ITU-T Y.3001: Глобальная информационная инфраструктура, аспекты протокола интернет и сети последующих поколений [Электронный ресурс] / ITU: Committed to connecting the world. – Режим доступа: [www/ http://www.itu.int](http://www.itu.int). – 10.03.2018 г. – Загл. с экрана.
2. Додонов А. Г. Живучесть информационных систем. / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ. –К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.
3. Стекольников Ю. И. Живучесть систем / Ю. И. Стекольников. – СПб.: Политехника, 2002. – 155 с.
4. Громов Ю. Ю. Синтез и анализ живучести сетевых систем / Ю. Ю. Громов, В. О. Драчев, К. А. Набатов, О. Г. Иванова/ – М.: МАШИНОСТРОЕНИЕ-1, 2007.
5. Кривошея Д. О. Исследование функциональной живучести модели системы видеоконференцсвязи, развернутой на беспроводной ячеистой сети / Д. О. Кривошея // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ»/ – № 4/ – 2013.
6. Князева Н. А. Метод определения функциональной живучести при децентрализованном управлении интеллектуальным сервисом. / Н. А Князева // Одесса . Холодильна техніка та технологія. – 53 (2), 2017. – С. 66-73.
7. Kniazieva N. The Method of Determining the Functional Survivability of the Control of the Intelligent Services. / N. Kniazieva, L. Zimenko, T. Kunup // SCIENCE AND EDUCATION A NEW DIMENSION. Natural and Technical Sciences. IV(10), Issue 91, 2016.
8. Князева Н.О. Теорія проектування комп'ютерних систем і мереж. Ч. 2. Методи аналізу і синтезу комп'ютерних мереж / Н.О. Князева. – Одеса. – СПД Бровкін О.В., 2012 .

REFERENCES

1. ITU-T Recommendation Y.3001: *Global Information Infrastructure, Aspects of Internet Protocol and Next Generation Networks* (2018), [ITU: Committed to connecting the world, available at: [www/http://www.itu.int](http://www.itu.int), 10/03/2018, In accordance with from the screen.
2. Dodonov, A.G. (2011), *Survivability of information systems*, Nauk. Dumka, Kyiv, 256 p.
3. Stekolnikov, Yu.I. (2002), *Survivability of systems*, Stekolnikov, Politechnica, St. Petersburg, 155 p.
4. Gromov, Yu.Y., Drachev, V.O., Nabatov, K.A. and Ivanova, O.G. (2007), *Synthesis and analysis of the survivability of network systems*, PUBLISHING MECHANICAL ENGINEERING-1, Moscow.
5. Krivosheya, D.O. (2013), "Investigation of the functional survivability of a video conferencing system model deployed on a wireless mesh network", *Naukovedenie*, No. 4.
6. Kniazieva, N.A. (2017), "The method of determining the functional survivability in the decentralized management of intelligent service", *Refrigeration Engineering and Technology*, Odessa, 53 (2), pp. 66-73.
7. Kniazieva, N., Zimenko, L. and Kunup T. (2016), "The Method of Determining the Functional Survivability of the Control of the Intelligent Services", *SCIENCE AND EDUCATION A NEW DIMENSION. Natural and Technical Sciences*, IV (10), Issue 91.
8. Knyazeva N.O. *Theory of the project of computer systems and imagery. Q2. Methodology of analysis and synthesis of computers*, SPD Brovkin OV, Odessa.

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. С. Г. Семенов,
 Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків
 Received (Надійшла) 9.04.2018
 Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

**Метод обеспечения функциональной живучести интеллектуальной надстройки
 с централизованным принципом управления предоставлением интеллектуального сервиса**

Л.Н. Зименко

Предметом изучения в статье является процесс определения и повышения функциональной живучести интеллектуальной надстройки (ИН) с централизованным принципом управления предоставлением (ЦПУ) интеллектуальным сервисом (ИС). Целью является разработка метода обеспечения функциональной живучести ИН с ЦПУ предоставлением ИС. **Задачи:** 1) определить этапы предоставления ИС для определения функциональной живучести ИН с ЦПУ; 2) определить метод повышения функциональной живучести для ИН с ЦПУ предоставлением ИС. Получены следующие **результаты**. Введено понятие множества функции системы, множества функциональных элементов: множества функциональных ресурсов системы, множества функциональных связей между ресурсами, классы интеллектуальных услуг, маршрут, представляющий процесс предоставления интеллектуальных сервисов определенного класса. Метод заключается в определении условных вероятностей событий, состоящих в неблагоприятном воздействии (НВ) на уровень функциональных ресурсов и функциональных связей ИН, определении маршрутов реализации процесса предоставления ИС заданного класса, определении условных вероятностей поражения элементов всех уровней функциональных ресурсов и функциональных связей. На основе полученных значений данных вероятностей осуществляется определение показателя функциональной живучести, обеспечение нужного значения которого достигается применением процедуры оптимизации структуре резервов функциональных элементов. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: впервые разработан метод обеспечения функциональной живучести ИН с ЦПУ предоставлением ИС.

Ключевые слова: функциональная живучесть; неблагоприятное воздействие; маршрут; класс интеллектуальных сервисов; функциональные ресурсы; функциональные связи; резервирования.

**The method of ensuring the functional survivability of the intelligent superstructure with the centralized principle
 of control the provision of intelligent service**

L. Zimenko

The **subject** of the study in the article is the process of determining and enhancing the functional survivability of the intelligent superstructure (IN) with the centralized control principle of provision (CCP) by intelligent service (IS). The **purpose** is to develop a method for providing functional survivability of IN with the CPU by providing IS. **Tasks:** 1) define the stages of providing the IS to determine the functional survivability of the IN with the CPU; 2) determine the method of increasing the functional survivability for the IN with the CPU providing the IS. The following results are obtained. The concept of the set of system functions and the set of functional elements is introduced: the set of functional resources of the system, the set of functional connections between resources, the classes of intelligent services, the route representing the process of providing intelligent services of a certain class. The method consists in determining the conditional probabilities of adverse events (AE) on the level of functional resources and functional links of the IN, determining the routes of implementation of the process of providing the IS of a given class, determining the probable probabilities of damage to elements of all levels of functional resources and functional relationships. On the basis of the obtained values of probability data, a determination of the index of functional survivability is carried out, ensuring the desired value of which is achieved by applying a procedure for optimizing the structure of the reserves of functional elements. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is as follows: for the first time the method of ensuring the functional survivability of the IN with the CPU by providing the IS.

Keywords: functional survivability; adverse effects; route; class of intelligent services; functional resources; functional connections; redundancy.

Я. С. Обіход, В. П. Лисечко, О. М. Прогонний, Г. М. Качуровський, С. В. Сколота

Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна
Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИБОРУ КАНАЛІВ КОГНІТИВНОГО РАДІО ПРИ МНОЖИННОМУ ДОСТУПІ ПЕРВИННИХ ТА ВТОРИННИХ КОРИСТУВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ «ENERGY HARVESTING» ПІД КЕРУВАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Когнітивне радіо (КР) є однією з основних частин телекомунікаційних систем зв'язку (ТСС-ІОЕ) в зв'язку з тим, що були покликані вирішити питання дефіциту спектру та впровадження інтелектуальних функцій. Вибір каналу з множинним доступом первинних користувачів (ПК) та вторинних користувачів (ВК) є однією з найголовніших проблем стандарту. Через конкуренцію каналів відбувається взаємний вплив пакетів первинних та вторинних користувачів. З метою зменшення конкуренції каналів серед вторинних користувачів, було розроблено метод вибору каналів когнітивного радіо при множинному доступі первинних та вторинних користувачів з використанням технології «Energy harvesting» під керуванням нейронної мережі. На основі розробленого методу було реалізовано гібридну модель передачі даних під керуванням нейронної мережі для кожного вторинного користувача. Для цієї моделі характерні властивості, при яких вторинний користувач може випадковим не регламентованим чином працювати в режимах суміщення з зайнятими каналами з використанням технології «Energy harvesting» (ЕН) та перекриття. Крім того, для реалізації розробленого методу було визначено критерій вибору каналу на основі конкуренції серед множинних запитів вторинних користувачів для передачі даних або технології «ЕН». На основі цього критерію створюється конкуруючий набір послідовностей. Моделювання показує, що запропонований метод спільного використання каналів та критерій вибору каналів перевершують інші методи з точки зору помилкової зайнятості (помилки), середньої пропускної здатності, середнього часу очікування та ефективності збору енергії вторинного користувача.

Ключові слова: вторинний користувач, збереження енергії, когнітивне радіо, колізія, нейронна мережа первинний користувач, передача даних, радіо хвилі, радіочастотний спектр.

Постановка проблеми. Останнім часом відбувається безперервна розробка безпроводових пристроїв та послуг, які інтегруються здебільшого в середовище Інтернет (ІоЕ) [1-3]. В мережі Інтернет, де всі елементи пов'язані однією мережею, попит на пропускну здатність при обмеженому спектрі значно зростає. Брак ресурсів радіочастотного спектру став серйозною проблемою 21 століття. Ця проблема пов'язана здебільшого з традиційним підходом до розподілу спектру, при якому певна частина спектру може використовуватися тільки ліцензованими системами безпроводового зв'язку.

Дефіцит частотного спектру та наявність «спектральних дір» ліцензованого спектру сприяють появі технологій, таких як технологія когнітивного радіо, яка в даний момент активно розробляється, а Федеральна комісія зі зв'язку (FCC) США схвалила неліцензоване використання ліцензованого спектру, використовуючи когнітивного радіо [4, 5]. Когнітивне радіо розробляється як ефективний підхід до усунення дефіциту спектру [6-8]. Тому впровадження когнітивного радіо в середовище ІоЕ може забезпечити доступ до фіксованих частот між декількома користувачами.

В когнітивному радіо було запропоновано механізм динамічного спектрального доступу (DSA). Існують дві основні моделі передачі даних для ВК, що ефективно використовують «спектральні діри»: режим перекриття (РП) [9] та суміщення (РС) [10]. В

режимі перекриття ВК може не регламентованим чином використовувати ліцензовані частоти тільки в тому випадку, якщо первинний користувач не активний. Тобто, вторинний користувач не має доступу до спектру одночасно з первинним користувачем, щоб запобігти будь-яким помилкам при передачі первинного користувача. В режимі суміщення, якщо первинний користувач отримує доступ до своєї частоти, вторинний користувач може співіснувати з передачею даних первинному користувачу, доки завади, викликані вторинними користувачами, не погіршать якість зв'язку первинного користувача до певного рівня. Коли первинний користувач переходить в неактивний стан, потужність передачі вторинного користувача буде обмежена порогом, вказаним в цьому режимі. Тому частоти незайнятого спектру не використовуються в повній мірі, і вторинний користувач в режимі суміщення не забезпечує максимальну продуктивність. З іншого боку, коли в певній області частот спостерігається висока активність використання спектру, протягом якого вторинний користувач повинен чекати на вільний канал, це значно знижує продуктивність режиму перекриття. Тому існує необхідність розробки гібридної моделі передачі даних на основі нейронної мережі, в якій переваги режиму перекриття та режиму суміщення будуть поєднані так, щоб продуктивність вторинного користувача була б максимальною при великій мінливості стану первинного користувача.

Аналіз літератури. В джерелах [12-14] було запропоновано гібридну модель передачі даних. Згідно джерела [12], вторинний користувач може обмінюватися керуючою інформацією як в режимі перекриття, та передавати дані, так само, як і в режимі суміщення. Таке рішення, про доступ та передачу, носить лише теоретичний характер. В джерелах [13, 14] вторинний користувач постійно аналізує спектр на наявність активності первинного користувача та передає дані так само, як і в режимі перекриття, коли факт роботи первинного користувача не виявлено. Якщо первинний користувач починає передавати дані, то, при цьому, вторинний користувач звільняє канал як і при режимі суміщення. Але в розглянутих роботах не враховувалися помилки при виявленні та повторна передача первинного користувача. В наведених роботах було показано, що вторинний користувач може покращити показники доступу до спектру в гібридній моделі передачі порівняно з двома стандартними режимами. Але питання про двох або більше вторинних користувачів, які конкурують за один канал практично не вивчалося. Більш того, імовірність виникнення помилок між вторинним та первинним користувачами збільшується в режимі множинних вторинних користувачів [15]. Таким чином, через важливість запобігання помилок співіснування, в мережі когнітивного радіо з декількома вторинними користувачами та декількома каналами, існує необхідність розробки критерію вибору каналу в гібридній моделі передачі на основі нейронної мережі для вирішення проблем помилок співіснування.

Енергоспоживання є важливою проблемою безпроводового зв'язку. В мережах з множинними вторинними користувачами, які використовують безліч первинних каналів в гібридній моделі передачі, вторинний користувач буде витратити більше енергії, ніж в стандартних методах, через те, що він буде постійно аналізувати, виявляти та переключатися між великою кількістю каналів. Тому енергоефективність є важливим критерієм в мережах когнітивного радіо поряд з ефективним використанням спектру [16, 17]. В сучасних джерелах описано нові методи ефективного енергозбереження [18, 19]. Такі технології дозволяють пристроям акумулювати енергію з природних джерел: сонячних, повітряних, акустичних та радіочастотних хвиль (РХ). Основна концепція полягає в тому, що відбувається перетворення навколишніх електромагнітних хвиль в електричну енергію. Такий підхід є більш відповідним та стабільним для пристроїв з низьким енергоспоживанням, аналізуючих систем, мереж когнітивного радіо, ніж підхід з іншими джерелами. Припускається, що вторинний користувач оснащений здатністю збору енергії радіохвиль і повинен не тільки обирати незайнятий канал для передачі даних, але і зайнятий канал для збору радіочастотної енергії. Відповідно, такий гібридний метод вибору каналу передачі даних актуальний для покращення ефективності використання спектру, так і для ефективності використання енергії в мережах когнітивного радіо.

Виходячи з вищеописаних переваг, в статті розроблено метод на основі конкуренції каналів між

вторинними користувачами для досягнення мінімальної кількості помилок в каналах з первинними користувачами в мережі когнітивного радіо з великою кількістю первинних та вторинних користувачів.

На сьогоднішній день не існує ефективного вирішення конкуренції каналів між декількома первинними та вторинними користувачами [10, 20, 21]. Грунтуючись на методі виявлення і концепції конкуренції каналів, для вирішення поставлених задач буде отримано можливість покращення точності аналізу спектру і пропускної здатності вторинних користувачів. Крім того, спираючись на розроблений метод, вторинні користувачі зможуть акумулювати радіочастотну енергію з зайнятих каналів, використовуючи технологію «Energy Harvesting».

Мета статті. Метою статті є розробка методу суміщеного використання спектру для зменшення імовірності помилок при виявленні вільних каналів та для зменшення кількості помилок при передачі вторинними користувачами, а також реалізація процедури вибору каналу для великої кількості вторинних користувачів на основі конкуруючого набору.

Основний матеріал. На рисунку 1 показано мережу з великою кількістю первинних та вторинних користувачів, де кожному первинному користувачеві виділено ліцензований канал («ПК-канал»). Як і в [9-11], трафік кожного каналу моделюється як марківський процес безперервний у часі. Такий процес має два стани — вільного і зайнятого спектру, що для первинного користувача відповідає включеному та виключеному стану. Кожний передавач вторинного користувача та відповідний йому приймач знаходиться в межах діапазону передачі один одного. Отже, існування зв'язку між двома вторинними користувачами залежить не тільки від відстані між ними, але і від передачі первинного користувача, що змінюється у часі.

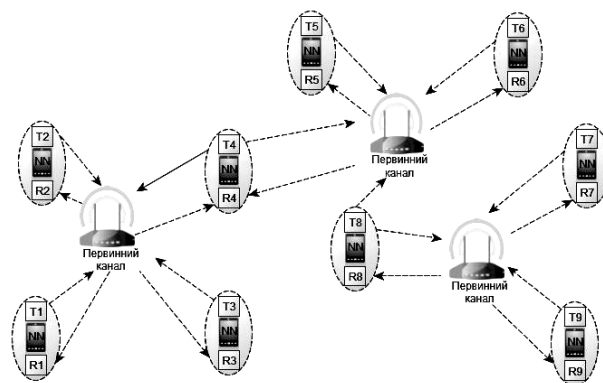


Рис. 1. Архітектура мережі когнітивного радіо з великою кількістю первинних та вторинних користувачів

З рис. 1 видно, що декілька вторинних користувачів можуть мати доступ до одного каналу, а один вторинний користувач може мати більше одного каналу для вибору.

Первинний користувач знаходиться в діапазоні передачі деяких вторинних користувачів. Відповідно, потужність каналу повинна бути збільшена:

1) від передавача первинного користувача до приймача (Gpp);

2) від передавача вторинного користувача до приймача (Gss);

3) від передавача первинного користувача до приймача вторинного користувача (Gps);

4) від передавача вторинного користувача до приймача первинного користувача (Gsp).

Модель такої системи має вигляд [25]:

$$G_{ij} = k \cdot d_{ij} \cdot \alpha, \quad (1)$$

де G_{ij} – потужність каналу і-ї передачі та j-го прийому; k – коефіцієнт загасання, який показує зміну потужності; d_{ij} – відстань між і-го передавача та j-го приймача; α – втрати при і-й передачі та j-му прийомі.

Рівень потужності та інформація про стан каналу (CSI) будуть відомі вторинному користувачу, в результаті чого він може отримати доступ до каналу після його виявлення.

Енергія від радіочастотного сигналу транслюється у всіх напрямках [18]. Але у зв'язку з невизначеним місцем розташування, загасаннями, завадами та умовами розповсюдження рівень енергії радіохвиль не може гарантувати QoS в безпроводових радіосистемах. Щоб покращити енергоефективність, енергія від радіохвиль перетворюється в постійну напругу, а потім зберігається в джерелі безперебійного живлення. Даною технологією визначено ефективну зону збору енергії. Така технологія передбачає, що кожен вторинний користувач може перетворити енергію тільки з радіохвиль від каналів первинного користувача. Кожен передавач вторинного користувача повинен бути оснащений приладом перетворення енергії та зберігати зібрану енергію в джерелі безперебійного живлення, який визначено максимальною ємністю E_{\max} . При цьому джерело безперебійного живлення моделюється ідеальною лінійною моделлю, де зміни в накопиченій енергії з каналів первинних користувачів для виявлення або передачі даних, що збільшує енергоефективність.

Виявлення спектральних «дір» є основою механізму DSA. Крім того, помилково знайдені канали впливають на продуктивність передачі вторинних користувачів та призводять до виникнення помилок в роботі первинних користувачів.

Спектральний аналіз повинен виконуватися перед передачею даних для виявлення доступності каналу. Більшість методів застосовуються вторинними користувачами для виявлення активності первинних користувачів [9]. Метод детектування енергетичної складової простий в реалізації і показує реальну картину зайнятості каналів. Тому такий метод є більш точним, навіть якщо вторинний користувач практично не має інформації про первинного користувача і взятий за основу в розробці методу як алгоритм зондування спектру. Тобто, основною метою вимірювання спектра є визначення зайнятості каналу в ліцензованій смузі частот. У відповідності з двома гіпотезами, описаними нижче, сигнал може бути виражений як [13]:

$$\begin{aligned} H_0 : x(t) &= n(t), \\ H_1 : x(t) &= s(t) + n(t). \end{aligned} \quad (2)$$

де H_0, H_1 – дві гіпотези про зайнятість або вільність каналу; $n(t)$ – адитивний білий гаусів шум (AWGN); $s(t)$ – сигнал первинного користувача в обраному каналі.

В [22] передбачається, що імовірність виявлення можна позначити через P_d з фіксованим SNR γ в каналі з AWGN і її можна представити як [14]:

$$P_d(\gamma, \tau, \lambda) = \alpha \left(\left(\frac{\lambda}{\sigma^2} - \lambda - 1 \right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}} \right), \quad (3)$$

де τ – тривалість виявлення; λ – поріг виявлення; f_s – частота дискретизації; σ – дисперсія AWGN; α – імовірність нормального розподілу.

При помилковому виявленні можливе виникнення двох типів помилок: хибна помилка і, власне, помилкове виявлення. Хибна помилка виникає, коли канал вільний, а вторинний користувач вважає, що канал зайнятий. При помилковому виявленні вторинний користувач ідентифікує канал як вільний, який фактично зайнятий. Звідси випливає, що хибна помилка вказує на невикористану можливість доступу до спектру, в той час як помилкове виявлення вносить потенційні завади в каналі з первинним користувачем. Імовірності виявлення хибної помилки f_s та помилкового виявлення f_m можуть бути представлені, відповідно, як [26]:

$$P_f(\tau, \lambda) = \alpha \left(\left(\lambda / \sigma^2 - 1 \right) \sqrt{\tau f_s} \right), \quad (4)$$

$$P_m(\gamma, \tau, \lambda) = 1 - \alpha \left(\left(\lambda / \sigma^2 - (1 + \gamma) \right) / (1 + \gamma) \sqrt{2 / (\tau P_s)} \right). \quad (5)$$

Через ефекти багатопроменевого завмирання, всередині високих будівель з високими втратами і локальними перешкодами та завадами, ймовірності хибної помилки і помилкового виявлення збільшуються при не суміщених методах виявлення, що призводить до помилок при прийомі-передачі між первинними та вторинними користувачами в мережах когнітивного радіо. У дослідженнях [11, 13, 19] було частково вирішено цю проблему. У розробці методу вибору каналів когнітивного радіо при множинному доступі первинних і вторинних користувачів під керуванням нейронної мережі дані будуть збиратися, аналізуватися і об'єднуватися для більш точного моделювання.

На рис. 2 зображено структуру з часовим інтервалом (TS). Такий TS складається з двох фаз, однією з яких є фази виявлення каналу (CS) і передачі даних (DT) або фази «збору» енергії. На першому етапі вторинні користувачі виявляють канали з активністю первинного користувача і обмінюються інформацією про зайняті або виявлені вільні канали даних вторинного користувача з іншими вторинними користувачами. Потім цю інформацію буде порівняно з відповідними результатами вимірювань вторинних користувачів. Остаточне рішення про стан виявленого каналу буде прийматися на підставі двох або більше підтверджених станів. Також канал може бути визначено, коли він виявляється тільки одним вторинним користувачем. На другому етапі

вторинний користувач здійснює «збір» енергії або DT на підставі певного стану каналу. Виходячи з [23] тривалість виявлення повинна бути настільки малою в порівнянні з часом передачі інформації первинного користувача, що можна припустити, що стан передачі інформації первинного користувача є незмінним під час фаз виявлення.



Рис. 2. Структура пакета з часовим інтервалом

На рис. 3 наведено гібридну модель передачі даних. Дані, що надходять, буферизуються в черзі даних передавача вторинного користувача Q_{Di} , де $I = 1 \dots N$, при максимальному об'ємі черги даних Q_{max} . Енергетична складова радіохвиль зберігається в джерелі безперебійного живлення, Q_{Ei} , де $i = 1 \dots N$, максимальна ємність якого позначається як E_{max} .

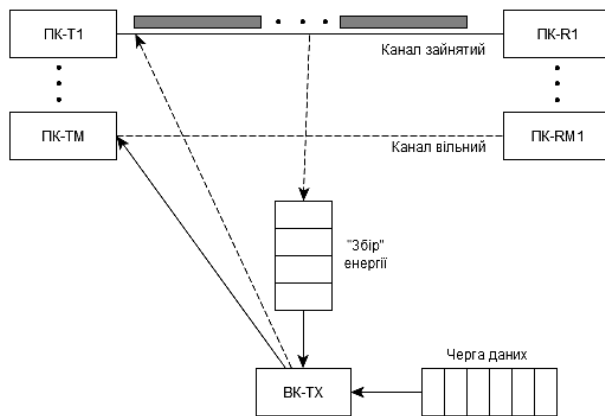


Рис. 3. Гібридна модель передачі даних

При ініціалізації каналу, коли дані надходять на передавач вторинного користувача, черга даних і енергетична ємність можуть бути представлені при $Q_{Di} \neq 0$, як $Q_{Di} = E_{max}$. Вторинний користувач може виконувати передачу даних при виявленні незайнятих каналів. Нехай $E(s)$ буде визначальним результатом вторинного користувача, а λ_0 та λ_u – енергетичний поріг моделі перекриття та суміщення, відповідно. Якщо енергія сигналу радіохвиль буде нижчою порогу суміщення, то $E(s) < \lambda_0$. Відповідно, вторинний користувач буде передавати дані з більшою швидкістю в режимі перекриття. Якщо енергія сигналу радіохвиль буде вищою порогу перекриття, але нижчою порогу суміщення, то $\lambda_0 < E(s) < \lambda_u$. Це означає, що первинний користувач не повністю займає виділений канал, і вторинний користувач може отримати до нього доступ одночасно з первинним користувачем. Вторинний користувач, зменшує потужність передавача так, щоб не заважати передачі первинного користувача, що відповідає моделі суміщення.

При використанні гібридної моделі передачі передбачається, що кожен передавач вторинного користувача володіє достовірною CSI. Для різних каналів величина і коефіцієнт використання різні. Грунтуючись на результатах вимірювання каналів,

кожен вторинний користувач самостійно обчислює статистичний поріг енергії в режимі суміщення та перекриття, і оновлюється до одного з двох станів виявлення помилок.

При надходженні даних на приймач вторинного користувача, він здійснює порівняння результатів поточного стану каналу з інформацією CSI, визначає потужність первинного користувача на підставі відстані і посилення антени, в тому випадку, якщо первинний користувач повністю не займає цей канал [24]. Для режиму перекриття немає обмеження для потужності передачі вторинного користувача. Для зміни поточного стану каналу в режим сполучення, через виникнення завад, викликаних впливом роботи вторинного користувача на канал первинного користувача, необхідно зменшити потужність передачі, змінити тип модуляції і визначити тип кодування, для забезпечення відповідного SNR.

При порожньому буфері даних вторинний користувач використовує енергозберігаючий режим, при якому $Q_{Di} = 0$, $Q_{Di} \neq E_{max}$, тобто вторинний користувач може «збирати» радіочастотну енергію зі спектра. Відповідно, якщо енергія такого каналу більше порогу моделі поєднання, то вторинний користувач може здійснювати «збір» енергії з неї.

У такій гібридній моделі передачі даних вторинний користувач може визначити, чи здійснювати йому передачу даних або «збір» енергії в залежності від буфера даних або стану джерела безперебійного живлення. Грунтуючись на результатах вимірювання спектра і порогових значеннях режиму суміщення або перекриття, кожен вторинний користувач може як отримувати доступ до каналу з ПК, так і накопичувати енергію з каналів, зайнятих первинним користувачем. Нейронна мережа, використовуючи накопичену інформацію про стани каналу, топології виявлених каналів, рівня випромінювання, дальності, приймає рішення про перехід на новий канал для передачі даних на зайнятих частотах для «збору» енергії або передачі даних в наступних фазах CS. Процес вибору режиму передачі для кожного вторинного користувача представлено на рис. 4.

На підставі розробленого методу гібридної моделі передачі даних кожен вторинний користувач може або передавати дані у вільному каналі, або здійснювати «збір» енергії з зайнятого каналу. Для мережі когнітивного радіо з великою кількістю первинних та вторинних користувачів однією з ключових проблем, пов'язаних з доступом до багатоканальних систем, є проблема конкуренції між вторинними користувачами. В статті було розроблено критерій передбачуваного вибору каналу.

Якщо виявлений незайнятий канал, передавач вторинного користувача відправляє пакет RTS по каналу на приймач вторинного користувача. Потім вторинний користувач, що приймає, відповідає пакетом CTS в тому ж каналі. У каналі можуть виникати колізії RTS і CTS пакетів, якщо один і той же канал використовує більше однієї пари вторинних користувачів. Відповідно, пара вторинних користувачів отримує доступ до каналу не відразу, а після того як один з них отримав CTS пакет.

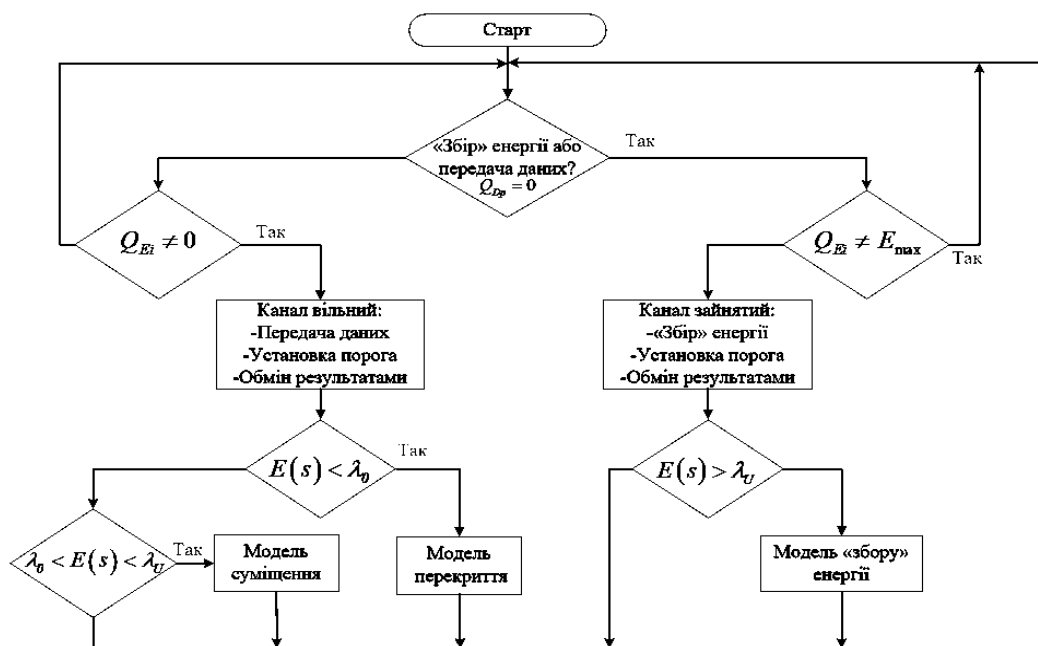


Рис. 4. Процес вибору режиму передачі вторинного користувача

Ті вторинні користувачі, які отримують CTS пакет утворюють конкуруючий набір - $S_{li} = 1 \dots M$, який показує, що ці вторинні користувачі конкурують за доступ до каналу первинного користувача. Припустимо, що розмір S_{li} - це W , якому довільно присвоюємо значення від 0 до $W-1$. Вторинний користувач, який має $W=0$, може передавати дані в режимі DT. Якщо вторинний користувач виявляє більше одного каналу, він може конкурувати за кілька незайнятих каналів і отримувати кілька значень з конкуруючого набору. Для збільшення пропускної спроможності нейронна мережа може розділити передачу даних на кілька каналів, при умові, якщо вона отримала нульове значення з конкуруючого набору. Коли канал може бути доступним лише в режимі суміщення для передачі даних, ті вторинні користувачі, які отримують CTS пакет, утворюють конкуруючий набір, $S_{Ui} = 1 \dots M$.

Вторинний користувач буде передавати дані до тих пір, поки стан каналу не зміниться і результат поточного стану не буде дорівнювати $E(s) < \lambda_0$ в наступному режимі CS. Коли вторинний користувач «виходить» з поточного каналу, всі інші вторинні користувачі автоматично встановлюють значення конкуруючого набору в $W-1$. Результат стану каналу буде $\lambda_0 < E(s) < \lambda_U$ в наступному CS режимі, тобто якщо первинний користувач не повністю займає весь канал для передачі в даний момент часу, вторинний користувач знижує рівень потужності, щоб були дотримані обмеження потужності перешкод первинного користувача, вказані в режимі суміщення. Якщо передача вторинного користувача призводить до виникнення завад в каналах первинного користувача при $E(s) > \lambda_U$, то передача даних буде припинена в наступній фазі DT, конкуруючий набір буде дорівнювати NULL. Алгоритм вибору каналу для передачі даних показано на рис. 5. Всі користувачі l_n , де $n \in [1, N]$ включаючи l_m займають вільні канали, $m \in [1, M]$ та p вторинного користувача, $p \in [1, P]$.

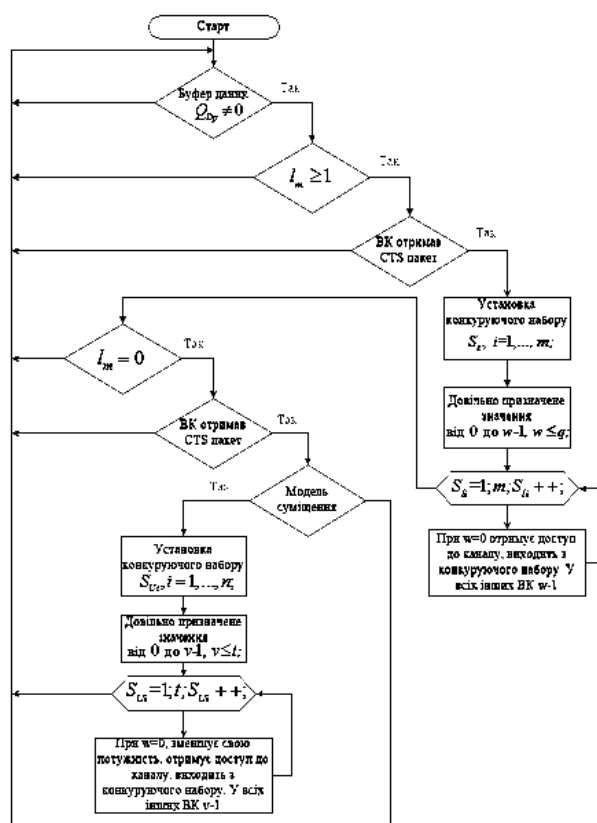


Рис. 5. Алгоритм вибору каналу для передачі даних

На рис. 6 наведено приклад довільного присвоєння конкуруючого набору. Чотири вторинних користувачі виявляють поточну доступність каналу, отримують список вільних і зайнятих каналів. Вторинні користувачі, які конкурують за один і той же канал, утворюють конкуруючий набір, тобто 1й, 2й, 3й вторинний користувач може використовувати канал А. Цим вторинним користувачам присвоюються довільні значення конкуруючого набору. Той вторинний користувач, який отримує нульове зна-

чення, може отримати доступ до каналів і вийти з закріпленого конкуруючого набору, в той час як значення конкуруючого набору інших вторинних користувачів буде зменшуватися на один. З рисунку 6 видно, що вторинний користувач під номером два може використовувати канали А і В. В наступному часовому інтервалі вторинний користувач під номером чотири може отримати доступ до каналу В.

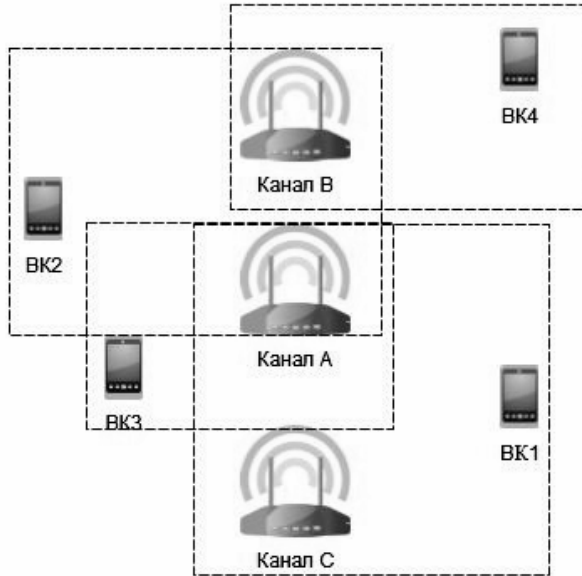


Рис. 6. Приклад довільного присвоєння конкуруючого набору

Вторинні користувачі, які конкурують за один і той же канал, утворюють конкуруючий набір, $S_{Ej} = 1, 2, 3, \dots, M$. Це означає, що ці канали конкурують за доступ до каналу первинного користувача і можуть накопичувати енергію. Створюється ще один конкуруючий набір, і той вторинний користувач, який отримав нульове значення, в наступній фазі ЕН буде накопичувати енергію. Вторинний користувач виходить з конкуруючого набору, якщо відбувається початок передачі даних з цим вторинним користувачем, або якщо джерело безперебійного живлення заповнилося. Приклад функціонування алгоритму вибору каналу для накопичення енергії наведено в табл. 1 на рис. 7.

Таблиця 1. Випадковий розподіл значень конкуруючого набору

Користувач	Вільний канал	Довільне значення 1	Канал передачі 1	Довільне значення 1	Канал передачі 1
1	А, С	1	С	0	С
2	А, В	0	А	0	А
3	А	2	-	1	-
4	В	1	-	0	В

Для визначення критерію вибору каналу приймач вторинного користувача відправляє пакет передавачу вторинного користувача, за умови, якщо поточну передачу завершено і дані успішно прийнято. Прапор перемикання каналів (CSW) встановлю-

ється при необхідності вторинного користувача переключитися на інший канал, після чого вторинний користувач дотримується процедур розриву зв'язку - «handoff» і виконує перемикання каналу.

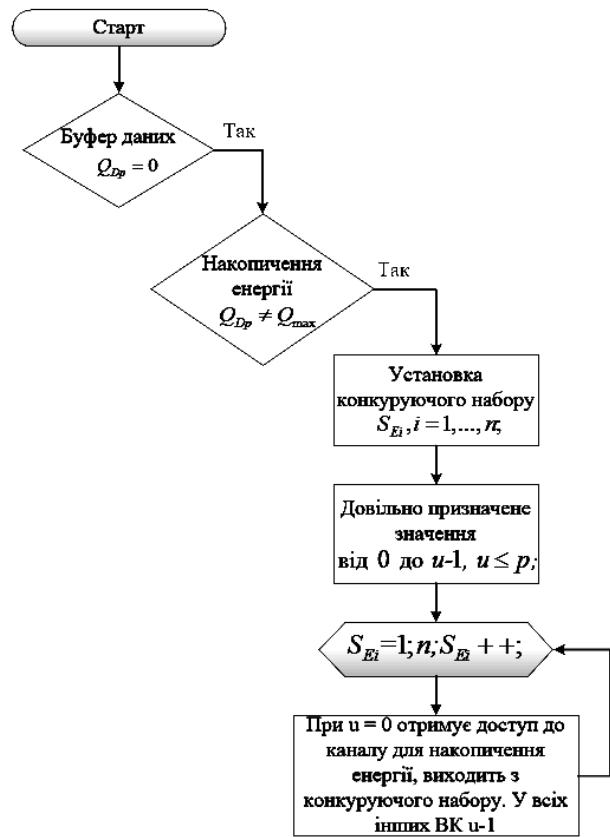


Рис. 7. Алгоритм вибору каналу для накопичення енергії

Протокол CSMA/CA використовує процедури встановлення зв'язку-«handshake», щоб мінімізувати зіткнення пакетів серед користувачів і алгоритм експоненціальної відмови. Кожен користувач робить випадкову затримку t , коли відбувається зіткнення пакетів, де t приймає значення від 0 до T в нижній частині експоненціального розподілу. Така політика забезпечує використання вільних каналів шляхом створення конкуруючих наборів і випадкового присвоєння значень. Для зменшення середнього часу очікування вторинні користувачі, які мають доступ до каналів, виходять з конкуруючих наборів, в той час як значення конкуруючого набору вторинного користувача зменшується на один.

Алгоритм визначення критерію вибору каналу вторинного користувача забезпечує передачу даних в режимі перекриття або суміщення. Швидкість обслуговування кожного вторинного користувача в гібридній моделі описується як $R_h = R_o + R_u$, де $R_h = R_o + R_u$ і може бути виражена через $R_o^0, R_o^1, R_o^{0'}, R_o^{1'}$ в моделі перекриття [27]:

$$R_o^0 = B \log_2(1 + g_s P_s^o), \quad R_o^1 = 0, \quad (6)$$

$$R_o^{0'} = B \log_2 \left(1 + \frac{g_s P_s^o}{g_p P_p + 1} \right), \quad R_o^{1'} = 0,$$

де R_o^0 – показник того, що первинний користувач не займає канал; R_o^1 – показник того, що первинний користувач займає канал; $R_o^{0'}$ та $R_o^{1'}$ – показники норми обслуговування кожного вторинного користувача при хибній помилці або помилковому виявленні. В моделі суміщення R_u може бути позначена як R_u^0 (7) та R_u^1 (8) відповідно:

$$R_u^0 = B \log_2 (g_s P_s^u), \quad (7)$$

$$R_u^1 = B \log_2 (1 + g_s P_s^u / (g_p P_p + 1)) \quad (8)$$

Пропускна здатність вторинного користувача описана в [28]:

$$T = 1 - p_{out}, \quad (9)$$

де p_{out} – імовірність відмови.

Пропускна здатність критерія вибору каналів T_h складається з T_o і T_u . T_o описується виразом:

$$T_o = p_i (1 - p_f) (1 - p_{out}^o) + (1 - p_i) p_f (1 - p_{out}^{o'}), \quad (10)$$

де p_i – імовірність «простою» каналу; p_{out}^o та $p_{out}^{o'}$ – хибна помилка та помилкове виявлення, які, відповідно, можуть бути виражені як (11) та (12):

$$p_{out}^o = Pr[R_o^0 < R_s], \quad (11)$$

$$p_{out}^{o'} = Pr[R_o^{0'} < R_s], \quad (12)$$

де R_s – прийнятна швидкість обслуговування вторинного користувача. Виходячи з вищеописаного ми можемо отримати T_u (13), p_{out}^u (14) та $p_{out}^{u'}$ (15):

$$T_u = p_i (1 - p_f) (1 - p_{out}^u) + (1 - p_i) p_f (1 - p_{out}^{u'}), \quad (13)$$

$$p_{out}^u = Pr[R_u^0 < R_s], \quad (14)$$

$$p_{out}^{u'} = Pr[R_u^{0'} < R_s]. \quad (15)$$

У формулі (16) показано час, що минув від прийому сигналу RTS до повної передачі даних, між кожним вторинним користувачем. Цей час відображає продуктивність конкуруючого набору. Нейронна мережа дозволяє більш прийнятно визначити вибір конкуруючого набору ніж звичайний критерій випадкового доступу. Середній час очікування вторинного користувача може бути описаний як:

$$T_w = T_t - T_{RTS}, \quad (16)$$

де T_t та T_{RTS} – час прийому-передачі вторинного користувача.

Ефективність накопичення енергії описується з точки зору залишкової енергії та може бути описана:

$$e_r^{t+1} = \min [e_r^t + e_h - (e^t + e_s + e_c), E_{max}], \quad (17)$$

де e_h – «пакети» енергії, які були зібрані вторинним користувачем в зайнятих каналах; e_r та e_s – енергія, споживана вторинним користувачем для передачі даних та виявлення каналів в спектрі, відповідно; e_c – інші втрати енергії; e_r^t – залишкова енергія в часовому інтервалі t .

Розглянемо чисельні результати реалізації методу вибору каналів когнітивного радіо при множинному доступі первинних і вторинних користувачів з використанням технології «Energy Harvesting» під керуванням нейронної мережі. В таблиці 2 наведено параметри моделювання. Розглянуто мережу з 20 первинними користувачами, 20 каналами і 25 парами вторинних користувачів. Для моделювання буде взята нейронна мережа на основі радіальної базисної мережі (РБМ), яка буде керувати виявленням каналів, прийомом і передачею інформації, накопиченням енергії. Така нейронна мережа зможе звертатися до одного каналу і зможе мати більше одного каналу для вибору. Всі частоти спектра мають однаковий розмір, а довжина пакету первинного та вторинного користувачів буде фіксована.

Таблиця 2. Параметри моделювання

Параметр	Значення	Параметр	Значення
p_i	0,8	R_s	3bps
λ_0	0,3	P_p	15dB
λ_u	0,7	t	2ms
E_{max}	15	T	250 bit
Q_{max}	20	CTS	250 bit

На рис. 8 показано результати оцінки ймовірності хибної помилки при суміщеному і не суміщеному методі аналізу спектра з великою кількістю вторинних користувачів. Очевидно, що ймовірність хибної помилки зменшується зі збільшенням імовірності виявлення. Для непокданого методу аналізу спектра кількість вторинних користувачів не впливає на імовірність хибної помилки. При фіксованій імовірності виявлення суміщений метод аналізу спектра може забезпечити більш високу точність виявлення. Як описано вище, два і більше таких же результатів вважаються остаточним рішенням для доступу до каналу. Відповідно, ймовірність хибної помилки значно зменшується, коли вторинних користувачів буде два або три. Імовірності помилкового виявлення при ймовірності виявлення 0,85 зменшується швидше, коли кількість вторинних користувачів три або чотири. Т.ч., метод суміщеного аналізу спектра може підвищити точність виявлення каналу. Але використання при розрахунках вторинних користувачів, кількістю більше чотирьох, значно не вплине на імовірність хибної помилки. На рис. 9 показано середню пропускну здатність вторинного користувача у відомих моделях передачі даних і гібридній моделі з використанням нейронної мережі при різних кількостях зайнятих каналів. Як видно з рисунку, середня пропускна здатність вторинного користувача зменшується в моделі перекриття тільки при збільшенні кількості зайнятих каналів.

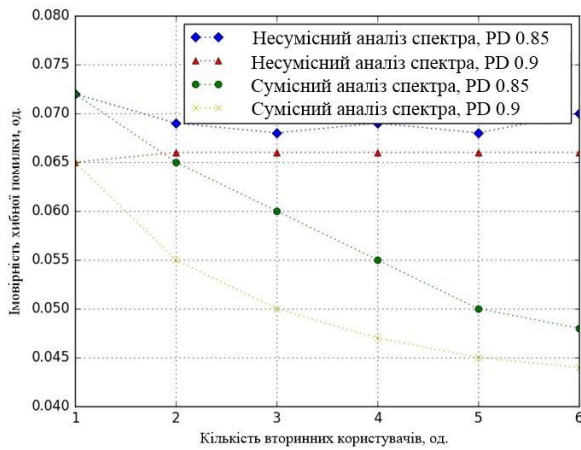


Рис. 8. Імовірність хибної помилки при суміщеному і несуміщеному методах аналізу спектра вторинного користувача

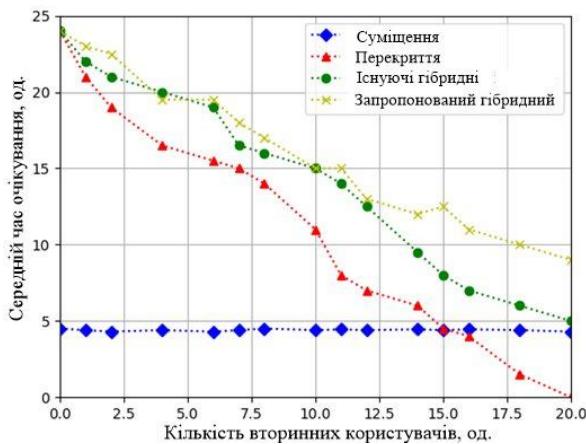


Рис. 9. Вплив моделі передачі на середню пропускну здатність вторинного користувача при різній кількості зайнятих каналів

Це пов'язано з тим, що велика кількість зайнятих каналів обмежує передачу вторинних користувачів лише в моделі перекриття. У моделі поєднання середня пропускну здатність практично не змінюється в зв'язку з тим, що вторинні користувачі можуть співіснувати з первинними користувачами. Запропонована гібридна модель з використанням нейронної мережі може забезпечити більш високу пропускну здатність у порівнянні з існуючими моделями. При зменшенні доступних каналів кількість передач вторинних користувачів стає меншою. Кількість помилок між вторинними користувачами стає більшою, оскільки існуюча гібридна модель заснована на кількості вторинних користувачів і ймовірності доступу. Але введена концепція конкуруючого набору зменшує кількість помилок при занятті каналу і покращує доступ до обмеженої кількості каналів. На рис. 10 показано середній час очікування вторинних користувачів в чотирьох різних моделях при різній кількості зайнятих каналів. Середній час очікування вторинного користувача значно зростає в моделі перекриття тільки зі зменшенням доступних вільних каналів. У моделі поєднання кількість доступних каналів мало впливає на передачу даних вторинного користувача і суттєво не збільшує час очікування.

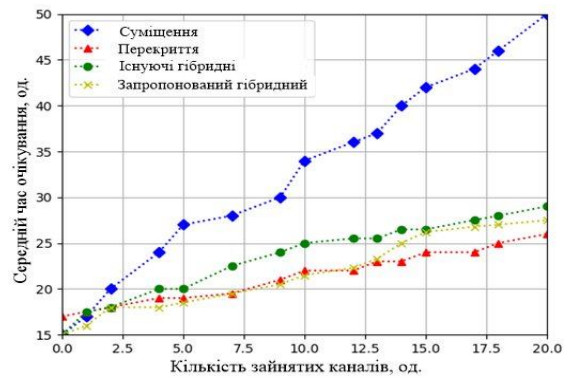


Рис. 10. Вплив моделі передачі даних на середній час очікування вторинного користувача при різній кількості зайнятих каналів

У моделі суміщення, інтенсивна передача інформації первинного користувача призводить до того, що деякі вторинні користувачі не можуть отримати доступ до каналів, що збільшує час очікування. Середній час очікування вторинних користувачів гібридної моделі з використанням нейронної мережі є нижчим, ніж аналогічний параметр для існуючої гібридної моделі, але приймає вище значення, ніж модель суміщення тільки при великій кількості зайнятих каналів первинними користувачами. Як було описано вище, вторинні користувачі можуть передавати дані за рахунок використання моделі суміщення, за умови, коли первинний користувач отримує доступ до свого незайнятого каналу, а їх поточні конкуруючі набори залишаються активними. Вторинні користувачі, які конкурують більше ніж з одним каналом, можуть отримати доступ до каналу в інших конкуруючих наборах, за умови зайнятості поточного каналу. Тому середній час очікування вторинного користувача буде меншим при застосуванні гібридної моделі з використанням нейронної мережі. Але оскільки гібридна модель буде розподіляти пріоритет каналам, до яких можна отримати доступ в режимі перекриття, і поодиноким каналам ставатиме менше, середній час очікування вторинного користувача при застосуванні гібридної моделі буде нижчим, ніж в гібридній моделі з використанням нейронної мережі.

На рис. 11 показано середню «залишкову» енергію вторинного користувача у звичайній мережі когнітивного радіо, існуючу мережу когнітивного радіо з енергозбереженням [22] і запроповану мережу когнітивного радіо зі збереженням енергії з використанням нейронної мережі в порівнянні з часом моделювання. Як показано на рисунку (11), технологія «Energy Harvesting» забезпечує необхідний рівень енергії для більш тривалого зв'язку. Крім того розроблена мережа когнітивного радіо з використанням «Energy Harvesting», за результатами моделювання, перевершує існуючу мережу когнітивного радіо з енергозбереженням. Як описано вище, вторинний користувач під керуванням нейронної мережі приймає рішення про відсутність вільних каналів для передачі даних або зайнятих каналів, для «збору» енергії, в залежності від стану буфера даних і кількості енергії.

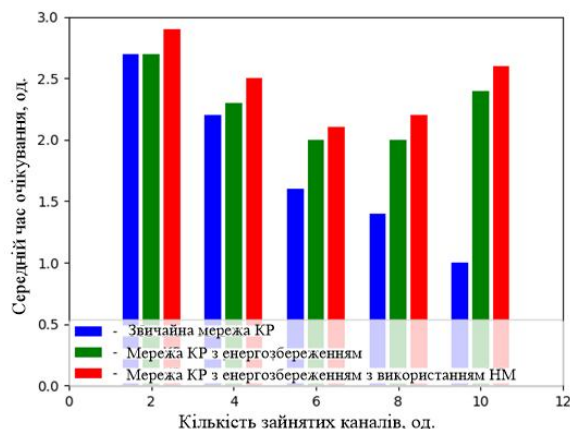


Рис. 11. Мережа когнітивного радіо зі збереженням енергії в різний час моделювання

Тобто вторинні користувачі можуть витрачати менше енергії для виявлення каналів. Також це сприяє тому, що вторинні користувачі мають більше часу для «збору» енергії, оскільки концепція конкуруючого набору може зменшити помилки, пов'язані з декількома конкуруючими вторинними користувачами для одного і того ж завантаженого каналу.

ВИСНОВКИ

У статті розглядалося вирішення задачі зменшення дефіциту спектра в телекомунікаційному середовищі. Розглядалася велика кількість вторинних користувачів в багатоканальній когнітивній радіомережі, в якій вторинні користувачі мають здатність «збору» енергії. У такій мережі ключовими проблемами є конкуренція каналів між вторинними користувачами та помилки при передачі вторинних користувачів в каналах з первинними користувачами.

тувачами та помилки при передачі вторинних користувачів в каналах з первинними користувачами.

Було запропоновано метод суміщеного використання спектра, для того щоб зменшити ймовірність помилок при виявленні вільних каналів і зменшити помилки при передачі вторинних користувачів. Для вирішення проблеми конкуренції каналів серед вторинних користувачів, було розроблено гібридну модель передачі для одного вторинного користувача. Кожен вторинний користувач може здійснювати передачу даних в незайнятому каналі або здійснювати «збір» енергії з каналу, в якому відбувається передача даних з урахуванням конкуруючого набору і стану ємності джерела безперебійного живлення. Також було розроблено методику визначення критерію вибору каналу для великої кількості вторинних користувачів на основі конкуруючого набору. Розроблена політика може забезпечити більш високу пропускну здатність у порівнянні з випадковою політикою. Головним недоліком випадкової політики є те, що такі помилки ніколи не будуть виявлені самі по собі і можуть тривати досить довго. Конкуруючий набір, який використовують вторинні користувачі в розробленому методі в значній мірі будуть усувати недоліки випадкової політики. Вторинний користувач може виявити помилку при передачі в фазі CS і припинить передачу на наступній фазі DT/EN, але розроблена модель дозволяє скоротити такі помилки до мінімуму. Запропонований метод суміщеного аналізу спектра і механізм визначення критерію вибору каналу перевершують відомі з точки зору ймовірності хибної помилки, середньої пропускну здатності, середнього часу очікування та ефективності «збору» енергії вторинного користувача.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Shiang, H., van der Schaar. Distributed resource management in multi-hop cognitive radio networks for delay sensitive transmission. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(2), 941–953, 2012.
- J. Jin, J. Gubbi, S. Marusic, and M. Palaniswami, “An information framework for creating a smart city through internet of things,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 2, pp. 112–121, 2014.
- C. Zhu, V. C. M. Leung, L. Shu, and E. C. H. Ngai, “Green internet of things for smart world,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2151–2162, 2015.
- W. Li, C. Zhu, V. C. M. Leung, L. T. Yang, and Y. Ma, “Performance comparison of cognitive radio sensor networks for industrial IoT with different deployment patterns,” *IEEE Systems Journal*, 2015.
- W. Li, V. Leung, C. Zhu, and Y. Ma, “Scheduling and routing methods for cognitive radio sensor networks in regular topology,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 47–58, 2016.
- Y. C. Liang, K. C. Chen, G. Y. Li, and P. Mahonen, “Cognitive radio networking and communications: an overview,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 7, pp. 3386–3407, 2011.
- E. Z. Tragos, S. Zeadally, A. G. Fragkiadakis, and V. A. Siris, “Spectrum assignment in cognitive radio networks: a comprehensive survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1108–1135, 2013.
- X. Zhai, L. Zheng, and C. W. Tan, “Energy-infeasibility tradeoff in cognitive radio networks: price-driven spectrum access algorithms,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 3, pp. 528–538, 2014.
- Y. Yilmaz, Z. Guo, and X. Wang, “Sequential joint spectrum sensing and channel estimation for dynamic spectrum access,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 11, pp. 2000–2012, 2014.
- N. Khambekar, C. M. Spooner, and V. Chaudhary, “On improving serviceability with quantified dynamic spectrum access,” in *Proceedings of the IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN '14)*, pp. 553–564, McLean, Va, USA, April 2014.
- T. M. C. Chu, H. Phan, and H. J. Zepernick, “Hybrid interweave-underlay spectrum access for cognitive cooperative radio networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 62, no. 7, pp. 2183–2197, 2014.
- V. Chakravarthy, X. Li, R. Zhou, Z. Wu, and M. Temple, “Novel overlay/underlay cognitive radio waveforms using sd-smse framework to enhance spectrum efficiency-part II: analysis in fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 6, pp. 1868–1876, 2010.
- K. Karmokar, S. Senthuran, and A. Anpalagan, “Physical layer-optimal and cross-layer channel access policies for hybrid overlay-underlay cognitive radio networks,” *IET Communications*, vol. 8, no. 15, pp. 2666–2675, 2014.
- J. Zou, H. Xiong, D. Wang, and C. W. Chen, “Optimal power allocation for hybrid overlay/underlay spectrum sharing in multiband cognitive radio networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 4, pp. 1827–1837, 2013.
- H. Cho and G. Hwang, “An optimized random channel access policy in cognitive radio networks under packet collision requirement for primary users,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 12, pp. 6382–6391, 2013.

16. S. Xie and Y. Wang, "Construction of tree network with limited delivery latency in homogeneous wireless sensor networks," *Wireless Personal Communications*, vol. 78, no. 1, pp. 231–246, 2014. View at Publisher
17. J. Shen, H. Tan, J. Wang, J. Wang, and S. Lee, "A novel routing protocol providing good transmission reliability in underwater sensor networks," *Journal of Internet Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 171–178, 2015.
18. S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy harvesting sensor nodes: survey and implications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 443–461, 2011.
19. Pratibha, K. H. Li, and K. C. Teh, "Energy-harvesting cognitive radio systems cooperating for spectrum sensing and utilization," in *Proc. of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM '15)*, San Diego, Calif, USA, December 2015.
20. S. Hu, Y. D. Yao, and Z. Yang, "Cognitive medium access control protocols for secondary users sharing a common channel with time division multiple access primary users," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 14, no. 2, pp. 284–296, 2014.
21. H. A. B. Salameh and M. F. El-Attar, "Cooperative OFDM-based virtual clustering scheme for distributed coordination in cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 8, pp. 3624–3632, 2015.
22. S. Park, H. Kim, and D. Hong, "Cognitive radio networks with energy harvesting," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 3, pp. 1386–1397, 2013.
23. W. B. Chien, C. K. Yang, and Y. H. Huang, "Energy-saving cooperative spectrum sensing processor for cognitive radio system," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 58, no. 4, pp. 711–723, 2011.
24. P. J. Smith, P. A. Dmochowski, H. A. Suraweera, and M. Shafi, "The effects of limited channel knowledge on cognitive radio system capacity," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 2, pp. 927–933, 2013.
25. S. P. Herath and N. Rajatheva, "Analysis of equal gain combining in energy detection for cognitive radio over Nakagami channels," in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '08)*, pp. 1–5, New Orleans, La, USA, November 2008.
26. T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, 2009.
27. M. G. Khoshkholgh, K. Navaie, and H. Yanikomeroglu, "Access strategies for spectrum sharing in fading environment: overlay, underlay, and mixed," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 9, no. 12, pp. 1780–1793, 2010.
28. Y. Wang, P. Ren, F. Gao, and Z. Su, "A hybrid underlay/overlay transmission mode for cognitive radio networks with statistical quality-of-service provisioning," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, no. 3, pp. 1482–1498, 2014.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С. І. Приходько,

Український державний університет залізничного транспорту, Харків

Received (Надійшла) 21.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.04.2018

Разработка метода выбора каналов когнитивного радио при множественном доступе первичных и вторичных пользователей с использованием технологии «energy harvesting» под управлением нейронной сети

Я. С. Обиход, В. П. Лысечко, А. М. Прогонный, Г. Н. Качуровский, С. В. Сколота

Когнитивное радио (КР) является одной из основных частей телекоммуникационных систем связи (ТСС-ИОЕ) в связи с тем, что были призваны решить вопрос дефицита спектра и внедрение интеллектуальных функций. Выбор канала с множественным доступом первичных пользователей (ПК) и вторичных пользователей (ВК) является одной из главных проблем стандарта. Из-за конкуренции каналов происходит взаимное влияние пакетов первичных и вторичных пользователей. С целью уменьшения конкуренции каналов среди вторичных пользователей, был разработан метод выбора каналов когнитивного радио при множественном доступе первичных и вторичных пользователей с использованием технологии «Energy Harvesting» под управлением нейронной сети. На основе разработанного метода было реализовано гибридную модель передачи данных под управлением нейронной сети для каждого вторичного пользователя. Для этой модели характерны свойства, при которых вторичный пользователь может случайным не регламентированным образом работать в режимах совмещения с занятыми каналами с использованием технологии «Energy Harvesting» (EH) и перекрытия. Кроме того, для реализации разработанного метода был определен критерий выбора канала на основе конкуренции среди множественных запросов вторичных пользователей для передачи данных или технологии "Energy Harvesting". На основе этого критерия создается конкурирующий набор последовательностей. Моделирование показывает, что предложенный метод совместного использования каналов и критерий выбора каналов превосходят другие методы с точки зрения ложной занятости (ошибки), средней пропускной способности, среднего времени ожидания и эффективности сбора энергии вторичного пользователя.

Ключевые слова: вторичный пользователь, сохранение энергии, когнитивное радио, коллизия, нейронная сеть, первичный пользователь, передача данных, радио волны, радиочастотный спектр.

Development of cognitive radio codes selection method with multiple access of primary and secondary users with the use of energy harvesting technology under the control of the neural network

Ya. Obikhod, V. Lysechko, O. Progonniy, H. Kachurovskiy, S. Skolota

Cognitive radio (CD) is one of the main parts of telecommunication communication systems (TCS-IOE) in connection with what was called to solve the problem of spectrum deficit and the introduction of intellectual functions. The choice of channel with multiple access of primary users (PCs) and secondary users (VCs) is one of the most important issues of the standard. Due to the competition of channels there is a mutual influence of packages of primary and secondary users. In order to reduce channel competition among secondary users, a method for choosing cognitive radio channels was developed at the multiple access of primary and secondary users using the technology "Energy Harvesting" under the control of the neural network. Based on the developed method, a hybrid model for data transmission under the control of the neural network for each secondary user was implemented. For this model there are properties in which a secondary user may randomly operate unregulatedly in combination with the occupied channels using the technology "Energy Harvesting" (EH) and the overlap. In addition, to implement the developed method, the criterion for choosing a channel based on competition among the multiple requests of secondary users for data transmission or the "Energy Harvesting" technology was determined. Based on this criterion, a competing set of sequences is created. The simulation shows that the proposed channel sharing method and the channel selection criterion outperform other methods in terms of false occupation (error), average throughput, average waiting time, and second-power energy efficiency.

Keywords: secondary user, energy conservation, cognitive radio, collision, neural network, primary user, data transmission, radio waves, radio frequency spectrum.

Г. В. Сокол¹, А. О. Москаленко², Н. В. Рвачова³, Т. В. Буряк¹, Ю. В. Глуховець¹, В. В. Варич¹

¹ Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава, Україна

² Полтавський інститут бізнесу ПВНЗ «Міжнародний науково-технічний університет імені академіка Юрія Бугая», Полтава, Україна

³ ТОВ НВП «Радікс», Кропивницький, Україна

ПЕРЕШКОДОСТІЙКІСТЬ СИГНАЛІВ МОДУЛЯЦІЇ ЦИКЛІЧНИМ ЗСУВОМ КОДУ З АДАПТАЦІЄЮ ПО ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Предметом дослідження є перешкодостійкість сигналів адаптивної модуляції. **Мета** – дослідження перешкодостійкості сигналів удосконаленої модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації. **Результати досліджень.** В роботі представлено результати порівняльного аналізу перспективних методів широко-смужової модуляції. Розглянуто основні принципи побудови перспективних радіоінтерфейсів. Запропоновані математичні моделі синтезу та кореляційної обробки сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації. Досліджено перешкодостійкість сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації. **Висновки та область застосування результатів досліджень.** Досліджено перешкодостійкість запропонованих сигналів. Використання сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації дозволить гнучко адаптувати параметри перспективних радіоінтерфейсів до умов поширення радіохвиль, зберігаючи максимальні швидкості передачі даних і мінімальну складність цифрової кореляційної обробки на прийомі.

Ключові слова: модуляція циклічним зсувом коду, адаптивна модуляція, кореляційна обробка сигналів, швидке перетворення Фур'є, моделювання дискретного каналу зв'язку, математична модель.

Вступ

Постановка проблеми. На сьогодні, одним із пріоритетних завдань усіх силових структур України є боротьба з тероризмом, загроза прояву якого використовується як засіб залякування держави у політичних цілях. Складність проведення заходів із протидії терористичним загрозам полягає у необхідності здійснення всього комплексу заходів, зокрема усунення чинників, що впливають на виникнення та розвиток тероризму (економічні, культурні і соціальні).

Ефективність проведення контртерористичних операцій напряму залежить від технічної оснащеності відповідних підрозділів, зокрема і комплексами радіозв'язку. Тому, виникає завдання у постійному вдосконаленні існуючих та розробці перспективних комплексів радіозв'язку.

При використанні вузькосмугових сигналів в системах бездротового зв'язку існує ряд недоліків: низька перешкодостійкість, низька структурна та енергетична скритність, неефективне використання частотного ресурсу та ін. Суттєво покращити ці характеристики можливо шляхом використання сигналів з розширенням спектру.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Перспективними методами широкосмугової модуляції є МВОК (M-ary Biorthogonal Keying – М-ічна двоортогональна модуляція), CCSSK (Cyclic Code Shift Keying – модуляція циклічним зсувом коду), OCDM (Orthogonal Code Division Multiplex – мультиплексування сигналів з ортогональним кодовим ущільненням), OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex – мультиплексування сигналів з ортогональним частотним ущільненням). За результатами аналізу даних методів модуляції встановлено, що найкращим методом є МВОК завдяки високій стійкості до

радіоперешкод та багатопроменевого розповсюдження радіохвиль [1, 2]. Іншим перспективним методом є CCSSK [3], він поступається М-ічній двоортогональній модуляції внаслідок використання неортогонального алфавіту сигналів та вразливості до багатопроменевого розповсюдження радіохвиль.

Змінюючи методи формування алфавіту сигналів CCSSK-модуляції можливо усунути вказані недоліки [4,5]. В результаті чого, модуляція циклічним зсувом коду, у порівнянні з МВОК, отримує перевагу за рахунок забезпечення більш високої швидкості передачі інформації та простоти кореляційної обробки сигналів. Але, для задоволення вимог до високошвидкісної передачі даних перспективні радіоінтерфейси повинні використовувати частотний діапазон ефективніше, ніж відомі радіотехнології. А це передбачає можливість використання багаторівневих форматів модуляції з високою стійкістю до частотно-селективних замирань, які спостерігаються в широкосмуговому радіоканалі. Тому, бажаною властивістю методів модуляції сигналів, які є кандидатами на використання в перспективних радіоінтерфейсах, є можливість адаптації до умов розповсюдження радіохвиль.

В [6] запропонований метод синтезу сигналів удосконаленої модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією за швидкістю передачі інформації, а також спосіб обробки сигналів, синтезованих з використанням запропонованого методу. Їх використання дозволяє гнучко адаптувати параметри перспективних радіоінтерфейсів до умов розповсюдження радіохвиль, зберігаючи максимальні швидкості передачі даних і мінімальну складність цифрової кореляційної обробки на прийомі. Проте, залишаються не дослідженими перешкодостійкість запропонованих сигналів в умовах багатопроменевого розповсюдження радіохвиль.

Мета статті. Враховуючи це, метою статті є дослідження перешкодостійкості сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації.

Результати досліджень

Метод модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації. При формуванні сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації враховуються параметри середовища поширення радіохвиль в слідстві чого змінюється швидкість передачі інформаційних біт. Це відбувається шляхом оцінювання основних параметрів середовища поширення і видачі сигналів, що управляють, на зміни швидкості передачі інформації передавачу і приймачу [6].

При використанні запропонованого методу модуляції швидкість передачі інформації може знаходитися в межах:

$$\frac{1}{\tau \cdot N} \leq V \leq \frac{\log_2 N}{\tau \cdot N},$$

де τ – протяжність чіпа; N – довжина послідовності розширення спектра сигналів; V – швидкість передачі інформації.

Приклад алгоритму формування сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації для кодової послідовності довжиною 8 біт приведений на рис. 1.

На рис.1 – ЗП (запам'ятовуючий пристрій). В запам'ятовуючому пристрої зберігається N циклічних зсувів кодової послідовності розширення спектра сигналів довжиною N біт.

Пристрій управління – здійснює управління швидкістю передавання інформації на основі отриманих даних. Для даного випадку, швидкість передачі інформації кратна ступеню двійки.

При формуванні сигналів на максимальній швидкості передавання інформації ($\frac{\log_2 N}{\tau \cdot N}$) кожна трійка інформаційних біт замінюється одним з восьми зсувів кодової послідовності розширення спектру сигналів, як і при класичній схемі CSSK-модуляції.

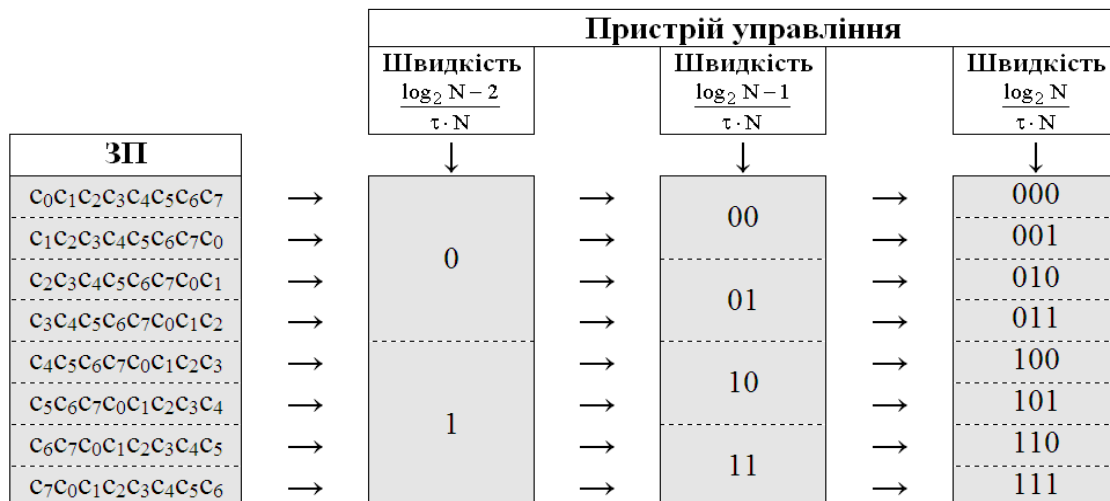


Рис. 1. Алгоритм формування сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації

Розглянемо приклад, коли надійшла команда на зміну швидкості передавання інформації до $\frac{(\log_2 N - 1)}{\tau \cdot N}$. В цьому випадку, сигнал формується таким чином. Кожна двійка інформаційних біт замінюється лише 1 (або 2), 3 (або 4), 5 (або 6) і 7 (або 8) циклічними зсувами відповідно до рис. 1. Сигнали при інших швидкостях передачі інформації формуються аналогічним чином.

Кореляційна обробка сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації. Кореляційна обробка сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації передбачає обчислення швидкого перетворення Фур'є вхідного сигналу, його поелементне множення з комплексно-спряженим спектром опорного сигналу, і оберненого швидкого перетворення Фур'є отриманого результату, що практично аналогічно обробці сигналів з модуляцією

циклічним зсувом коду (рис. 2). Різниця полягає в принципі роботи пристрою вирішення.

Принципи роботи пристрою вирішення при кореляційній обробці сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації представлено на рис. 3.

Для прикладу розглянемо принципи роботи пристрою вирішення при кореляційній обробці сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації для довжини кодової послідовності 8 біт.

При максимальній швидкості передачі інформації ($\frac{\log_2 N}{\tau \cdot N}$) кореляційний обробка сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації аналогічна обробці сигналів з модуляцією циклічним зсувом коду. Кожній трійці інформаційних біт відповідає один стан кореляційної матриці.

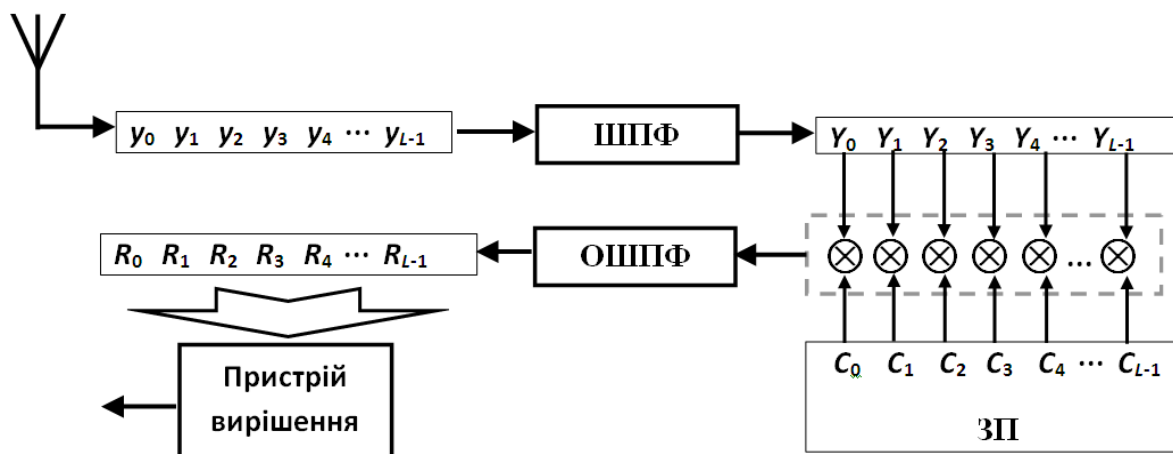


Рис. 2. Алгоритм кореляційної обробки сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації

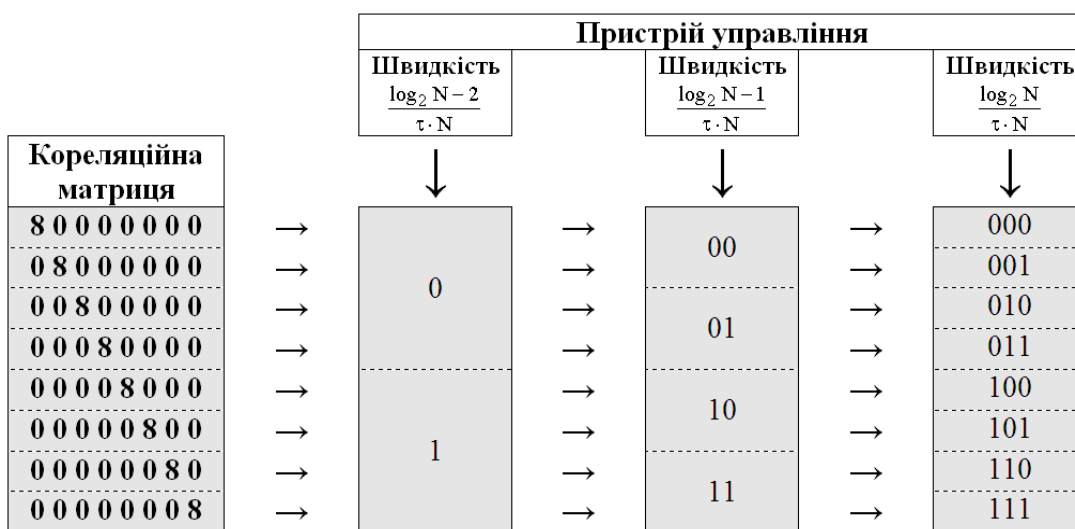


Рис. 3. Принципи роботи пристрою вирішення при кореляційній обробці сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації

При швидкості передачі інформації $\frac{\log_2 N - 1}{\tau \cdot N}$ кожній парі інформаційних біт відповідає два стани кореляційної матриці.

При швидкості передачі інформації $\frac{\log_2 N - 2}{\tau \cdot N}$ кожному інформаційному біту відповідає чотири стани кореляційної матриці.

Кореляційна обробка сигналів при інших швидкостях передачі інформації виконується аналогічним чином.

Перешкодостійкість сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації. За результатами моделювання, яке було проведено в середовищі Matlab, отримані залежності ймовірності помилкового прийому інформаційного біта ($P_{\text{пом}}$) від співвідношення часу затримки до часу проходження одного чіпа на вході приймача (τ_s/τ_c) при багатопроменевому розповсюдженні радіохвиль.

Залежності ймовірності помилкового прийому інформаційного біта від співвідношення часу затри-

мки до часу проходження одного чіпа при використанні сигналів удосконаленої модуляції циклічним зсувом коду приведені на рис. 4 (а-в). Співвідношення амплітуд сигналів прямого і віддзеркаленого променю 1:1.

На рис. 4, а приведено залежність ймовірності помилкового прийому інформаційного біта від співвідношення часу затримки до часу проходження одного чіпа для швидкості передавання даних $\frac{\log_2 N}{\tau \cdot N}$.

На рис. 4, б та 4, в приведено залежність ймовірності помилкового прийому інформаційного біта від співвідношення часу затримки до часу проходження одного чіпа для швидкостей передавання даних $\frac{\log_2 N - 1}{\tau \cdot N}$ і $\frac{\log_2 N - 2}{\tau \cdot N}$ відповідно.

За результатами моделювання з використанням сигналів удосконаленої модуляції циклічним зсувом коду, встановлено, що ймовірність помилкового прийому інформаційного біта наближається до 0,5 для максимальної швидкості передавання інформації

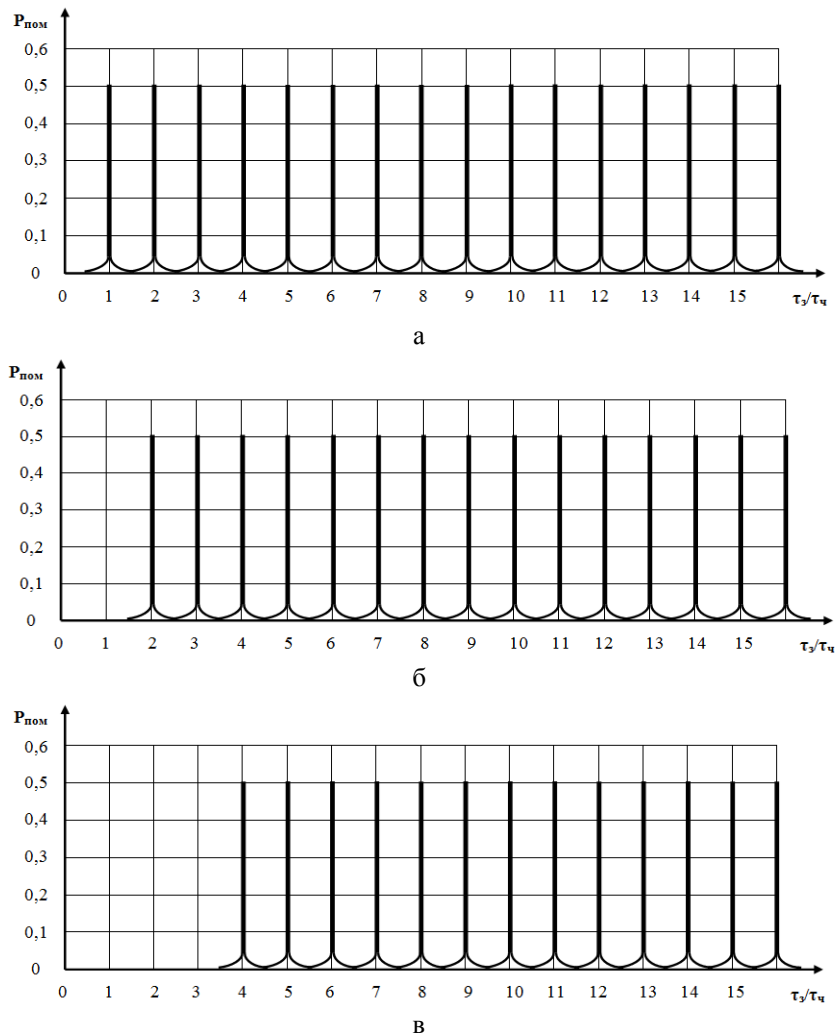


Рис. 4. Залежності ймовірності помилкового прийому інформаційного біту від співвідношення часу затримки до часу проходження одного чіпа при використанні сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації

у випадках, коли час затримки кратний тривалості чіпа, за умови що амплітуди віддзеркалених променів не більші за амплітуду прямого (рис. 4, а).

Для швидкості передавання інформації

$$\frac{(\log_2 N - 1)}{\tau \cdot N}$$

(рис. 4, б) ймовірність помилкового прийому інформаційного біта вперше наближається до 0,5 при затримці сигналу, кратній тривалості двох чіпів.

Далі характеристика аналогічна попередньому випадку.

Для швидкості передавання інформації

$$\frac{(\log_2 N - 2)}{\tau \cdot N}$$

(рис. 4, в) ймовірність помилкового прийому інформаційного біта вперше наближається до 0,5 при затримці сигналу, кратній тривалості чотирьох чіпів.

Далі характеристика аналогічна випадку, що ілюструє рис. 4,а.

Моделювання виконувалось для співвідношення амплітуд прямого і віддзеркаленого променів 1:1.

Висновки

Запропоновані математичні моделі синтезу та кореляційної обробки сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації, досліджено перешкодостійкість запропонованих сигналів.

Використання сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації дозволить гнучко адаптувати параметри перспективних радіоінтерфейсів до умов поширення радіохвиль, зберігаючи максимальні швидкості передачі даних і мінімальну складність цифровий кореляційної обробки на прийомі.

За результатами моделювання отримані залежності ймовірності помилкового прийому інформаційного біта від співвідношення часу затримки до часу проходження одного чіпа при використанні сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації.

Напрямок подальших досліджень є отримання характеристик структурної та енергетичної скритності сигналів модуляції циклічним зсувом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M. Webster et al., "Proposal for a high speed PHY for the 2.4 GHz band," IEEE P802.11-98/47, Jan. 1998.
2. Fisher et al., "DS-UWB physical layer submission to 802.15 task group 3a," IEEE P802.15-04/01373r3, July 2004.
3. G.M. Dillard et al., Cyclic Code Shift Keying: A Low Probability of Intercept Communication Technique // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Systems., vol. AES-39, July 2003, pp. 786-798.
4. Гепко І.А. Новий клас ортогональних кодів для телекомунікаційних систем CDMA і метод їх кореляційного приєма, мінімізуючий вичислительну складність цифрового сигнального процесора /І.А. Гепко, А.А.Москаленко// Зв'язок. – 2007. - № 6. – С. 33-39.
5. Гепко І.А. Свойства ортогональних сигналів з прямим розширенням спектра на основі завершених двоичних матриць і алгоритма їх кореляційної обробки /І.А. Гепко, А.А.Москаленко// Радиоелектроника (Изв. вузов). – 2008. – № 1-2. – С. 49-60.
6. Москаленко А.А. Метод синтезу сигналів удосконаленої модуляції циклічним сдвигом коду з адаптацією по швидкості передачі інформації / А.А.Москаленко, Г.В.Сокол// Науково-технічний журнал. Інформаційно керуєчі системи на залізничному транспорті", Харків, Випуск №3 (100), 2013. – С. 71-75.

REFERENCES

1. M. Webster et al., "Proposal for a high speed PHY for the 2.4 GHz band," IEEE P802.11-98/47, Jan. 1998.
2. Fisher et al., "DS-UWB physical layer submission to 802.15 task group 3a," IEEE P802.15-04/01373r3, July 2004.
3. G.M. Dillard et al., Cyclic Code Shift Keying: A Low Probability of Intercept Communication Technique // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Systems., vol. AES-39, July 2003, pp. 786-798.
4. Gepko I.A. Novyyiy klass ortogonalnykh kodov dlya telekommunikatsionnykh sistem CDMA i metod ih korrelyatsionnogo priema, minimiziruyushiy vychislitelnyuyu slozhnost tsifrovogo signalnogo protsessora /I.A. Gepko, A.A.Moskalenko// Zv'yazok. – 2007. – № 6. – S. 33-39.
5. Gepko I.A. Svoystva ortogonalnykh signalov s pryamyim rasshireniem spektra na osnove sovershennykh dvoichnykh matrits i algoritma ih korrelyatsionnoy obrabotki /I.A. Gepko, A.A.Moskalenko// Radioelektronika (Izv. vuzov). – 2008. – № 1-2. – S. 4-60.
6. Moskalenko A.A. Metod sinteza signalov usovershenstvovannoy modulyatsii tsiklicheskim sdivigom koda s adaptatsiey po skorosti peredachi informatsii / A.A.Moskalenko, G.V.Sokol// Naukovo-tehnichnyy zhurnal. Informatsiyno keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti", Harkiv, Vipusk №3 (100), 2013. – S. 71-75.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. К. С. Козелкова,
Державний університет телекомунікацій, Київ

Received (Надійшла) 28.02.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.04.2018

Помехоустойчивость сигналов модуляции циклическим сдвигом кода с адаптацией по скорости передачи информации

Г. В. Сокол, А. А. Москаленко, Н. В. Рвачова, Т. В. Буряк., Ю. В. Глуховец, В. В. Варич

Предметом исследования является помехоустойчивость сигналов адаптивной модуляции. **Цель** - исследование помехоустойчивости сигналов усовершенствованной модуляции циклическим сдвигом кода с адаптацией по скорости передачи информации. **Результаты исследований.** В работе представлены результаты сравнительного анализа перспективных методов широкополосной модуляции. Рассмотрены основные принципы построения перспективных радиоинтерфейсов. **Предложены математические модели синтеза и корреляционной обработки сигналов модуляции циклическим сдвигом кода с адаптацией по скорости передачи информации,** исследована помехоустойчивость сигналов модуляции циклическим сдвигом кода с адаптацией по скорости передачи информации. **Выводы и область применения результатов исследований.** Исследованы помехоустойчивость предложенных сигналов. Использование сигналов модуляции циклическим сдвигом кода с адаптацией по скорости передачи информации позволит гибко адаптировать параметры перспективных радиоинтерфейсов к условиям распространения радиоволн, сохраняя максимальные скорости передачи данных и минимальную сложность цифровой корреляционной обработки на приеме.

Ключевые слова: модуляция циклическим сдвигом кода, адаптивная модуляция, корреляционная обработка сигналов, быстрое преобразование Фурье, моделирование дискретного канала связи, математическая модель.

The anti-jamming ability of modulation signals by register rotation with rate adaptation

G. Sokol, A. Moskalenko, N. Rvachova, T. Buriak, Y. Hlukhovets, B. Varych

The research subject is the anti-jamming ability of adaptive modulations signals. **The purpose of research** is the investigation of improved modulation signals by register rotation with rate adaptation. **Research results.** The results of the comparative analysis of broadband modulations advanced techniques were considered in the paper. The main principles of perspective radio interfaces construction were considered. The mathematical models of synthesis and correlation processing of modulation signals by register rotation with rate adaptation were proposed. The anti-jamming ability of modulation signals by register rotation with rate adaptation was investigated. **Conclusions and scope of research results.** The anti-jamming ability of the proposed signals was analyzed. The using of modulation signals by register rotation with rate adaptation will provide flexible adaptation of perspective radio interfaces parameters to propagation radio-waves conditions, while the peak transfer rate and the minimal complexity of digital correlation processing on receiving are saved.

Keywords: modulation by register rotation, adaptive modulation, correlation signal processing, fast Fourier transform, discrete channel simulation, mathematical model.

С. Ю. Стасев, С. С. Серов, В. В. Сапрунов

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД ПОБУДОВИ РІЗНИЦЕВИХ МНОЖИН ДЛЯ СИНТЕЗУ ДИСКРЕТНИХ СИГНАЛІВ З ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Запропоновано метод побудови різневих множин. Сформульовані необхідні та достатні умови існування сигналів з заданими кореляційними, ансамблевими та структурними властивостями. Показаний взаємозв'язок кореляційних та структурних властивостей дискретних сигналів. Отримані математичні вирази, та сформульовані необхідні й достатні умови існування n -рівневої функцією кореляції істотно спрощують процедури синтезу сигналів із заданими кореляційними властивостями. Вирішення проблеми підвищення завадозахищеності, імітостійкості й скритності пов'язане з використанням множин сигналів, що задовольняють вимогам. Кожен сигнал даного ансамблю легко відрізняється від зсунутої в часі копії, кожний з сигналів даного ансамблю легко відрізняється від будь якого іншого сигналу цієї множини. Розроблений алгоритм побудови різневих множин дозволяє синтезувати й досліджувати статистичні характеристики авто- і взаємкореляційних властивостей дискретних систем сигналів. Синтез і дослідження властивостей дискретних систем сигналів з n -рівневою функцією кореляції може здійснюватися в межах або тільки неінверсно й інверсно ізоморфних, або довольного поєднання тих та інших перетворень. При цьому забезпечується вибір будь-якої довольної тривалості сигналу.

Ключові слова: радіоелектронна протидія, система зв'язку, дискретні сигнали, ансамблеві сигнали, завадозахищеність, імітостійкість.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Забезпечення активного завадо- та імітозахисту телекомунікаційних систем від засобів радіоелектронної боротьби пов'язують з використанням складних дискретних сигналів з заданими кореляційними та ансамблевими характеристиками [1-3].

Питанню синтезу складних сигналів, що мають необхідні властивості, присвячений ряд робіт [4-6], в яких сформульоване завдання синтезу складних сигналів у загальному вигляді і розглянуті характерні особливості синтезу.

Відзначимо, що в теперішній час існують різні напрями синтезу дискретних сигналів. У [5-7] запропоновані процедури синтезу дискретних сигналів асимптотичними методами в спектральній області за періодичною функцією автокореляції, які дозволяють одержати непогані наближення до необхідних значень функції автокореляції. Проте ці методи дозволяють синтезувати окремі сигнали, які мають необхідні періодичні функції автокореляції при $p = 2$.

Крім того, синтезовані в [1, 2] сигнали мають східчасту структуру, що приводить до використання додаткової амплітудної модуляції.

Мета статті: Запропонувати метод побудови різневих множин. Сформульовані необхідні та достатні умови існування сигналів з заданими кореляційними, ансамблевими та структурними властивостями.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

У [1, 5, 6] досліджуються питання синтезу p -ічних сигналів у часовій області за аперіодичною функцією автокореляції на основі розв'язання системи рівнянь вигляду

$$\begin{cases} R_1 = S_1 S_n^* \\ R_2 = S_1 S_{n-1}^* + S_2 S_n^* \\ \dots\dots\dots \\ R_n = S_1 S_1^* + S_2 S_n^* + \dots + S_n S_n \end{cases} \quad (1)$$

де S – дискретне значення фази елемента сигналу; $*$ – символ комплексної спряженості, яка визначає компоненту аперіодичної функції автокореляції сигналу $S_i \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$.

У [5] розв'язання системи (1) зведене до простого перебору компонент, при якому R_e не перевищує заданого значення $R_{зад}$.

У [1] запропоновані методи синтезу дискретних сигналів за функцією невизначеності в спектральній області. Використання цих методів дозволяє одержати, як і у разі синтезу дискретних сигналів за періодичною функцією автокореляції, двійкові сигнали східчастої форми. Метод синтезу сигналів з необхідними спектральними властивостями, викладений в [1], дозволяє одержувати сигнали з малим рівнем “бокових складових” амплітудного спектра. Проте в [1] не розглядаються ансамблеві й авто- і взаємкореляційні властивості синтезованих сигналів.

У [2-4] синтезовані дискретні сигнали з кращими авто- і взаємкореляційними властивостями на основі розв'язання сукупності систем нелінійних нерівностей вигляду

$$\begin{cases} R_0^{ii} = S_1^i S_1^{i*} + S_2^i S_2^{i*} + \dots + S_n^i S_n^{i*} = N; \\ R_{1min}^{ii} \leq S_1^i S_2^{i*} + S_2^i S_3^{i*} + \dots + S_n^i S_1^{i*} \leq R_{1max}^{ii}; \\ \dots \\ R_{(n-1)min}^{ii} \leq S_1^i S_n^{i*} + S_2^i S_1^{i*} + \dots + S_n^i S_{n-1}^{i*} \leq R_{(n-1)max}^{ii}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_0^{ij} \leq S_1^i S_1^{j*} + S_2^i S_2^{j*} + \dots + S_n^i S_n^{j*} \leq R_{0\max}^{ij}; \\ R_{1\min}^{ij} \leq S_1^i S_2^{j*} + S_2^i S_3^{j*} + \dots + S_n^i S_1^{j*} \leq R_{1\max}^{ij}; \\ \dots \\ R_{(n-1)\min}^{ij} \leq S_1^i S_n^{j*} + S_2^i S_1^{j*} + \dots + S_n^i S_{n-1}^{j*} \leq R_{(n-1)\max}^{ij}, \end{cases} \quad (3)$$

де системи (2) та (3) визначають компоненти функцій авто- і взаємкореляції; $R_k^{ii\min}$ і $R_k^{ii\max}$ – мінімально і максимально допустимі рівні бокових пелюсток функції автокореляції i -го сигналу при зсуві на k елементів; $R_k^{ij\min}$ і $R_k^{ij\max}$ – мінімально і максимально допустимі рівні бокових пелюсток функції взаємної кореляції i -го та j -го сигналів, при зсуві j -го сигналу відносно i -го на k елементів, одержаних у результаті розв'язання системи нерівностей (2).

Запропоновані в [6, 7] процедури синтезу дискретних сигналів дозволяють на відміну від інших методів синтезу дискретних сигналів синтезувати не окремі сигнали, а ансамблі сигналів, які мають необхідні авто- і взаємкореляційні властивості. Проте запропоновані в [6, 7] методи синтезу фазоманіпульованих сигналів мають ряд недоліків:

- не всі сигнали, синтезовані в результаті розв'язання системи нерівностей (2), задовольняють розв'язання системи (3), що призводить до великих часових витрат синтезу ансамблю сигналів;
- розв'язання систем нерівностей (2) і (3) одержано лише для випадку $p = 2$;
- не можна заздалегідь визначити об'єм ансамблю сигналів.

Таким чином, до теперішнього часу не розроблені методи синтезу великих ансамблів сигналів слабо корельованих між собою дискретних сигналів. Нижче розробляються теоретичні основи синтезу складних дискретних сигналів із заданими кореляційними, ансамблевими й структурними властивостями. Формуються необхідні умови існування складних сигналів з n -рівневою функцією кореляції.

Визначимо необхідні умови існування сигналів з n -рівневою функцією кореляції. Нехай дискретна ПФАК p -го вектора $\{W\}$ набуває n значень $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, причому кожне R_i значення, $i = \overline{1, n}$, задане. Тоді розв'язання задачі синтезу сигналу, функція автокореляції набуває n значень, зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь[^]

$$\begin{cases} R_i(0) = \sum_{k=1}^L W_k W_{k+m}^*; \\ \dots \\ R_i(l) = \sum_{k=1}^L W_k W_{k+m}^*; \\ \dots \\ R_i(L) = \sum_{k=1}^L W_k W_{k+m}^*, \end{cases} \quad (4)$$

де L – кількість елементів у векторі $\{W\}$, $i = \overline{1, n}$; W_k – p -ті елементи вектора $\{W\}$.

Проведені до теперішнього часу дослідження [6] показують, що залежно від значень R_i , L система рівнянь вигляду (4) може мати або μ розв'язків, або взагалі не має розв'язків.

Припустимо, що система (4) має μ розв'язків. Тоді при розв'язанні задачі синтезу квазіортогональних сигналів система повинна задовольняти такі вимоги:

- система синтезованих сигналів повинна забезпечити можливість їх синтезу й обробки на основі алгоритмів швидких перетворень в області узгальнених перетворень;
- процедури синтезу, з погляду обчислювальної ефективності, повинні бути оптимальними;
- формувачі синтезованих сигналів повинні бути реалізовані з необхідною технічною точністю, у тому числі й з використанням мікропроцесорної техніки;
- алгоритми, методики й програми синтезу квазіортогональних систем сигналів повинні задовольняти будь-які значення p і L ;

– розподіл символів у кожному сигналі повинен задовольняти критерію псевдовипадковості.

Проведений аналіз можливих методів розв'язання системи вигляду (4) відносно W_k при заданих значеннях R_i , $i = \overline{1, n}$ і L показав, що синтез p -го вектора $\{W\}$ може бути реалізований методом ітераційного рандомізованого розв'язання сукупності нелінійних рівнянь за методом гілок і меж та повинен бути орієнтований на застосування електронно обчислювальної машини. Розглянемо обмеження, що накладаються на L і R_i при $p = 2$, тобто розглянемо необхідні умови існування двійкових фазоманіпульованих сигналів з n -рівневою функцією автокореляції. З цією метою введемо деякі нові параметри вектора $\{W\}$ і виразимо через них $R_i(m)$. Нехай λ_m – кількість добутоків вигляду (+1) (+1) для заданого m у виразі (8.4) при обчисленні ПФАК. Тоді кількість добутоків вигляду (+1) (-1) в (8.4) дорівнює $k - \lambda_m$, де k – кількість одиниць в сигналі, вигляду (+1) (+1) – $L - (k - \lambda_m)$, а кількість добутоків (-1) (-1) дорівнює $[N - 2(k - \lambda_m) - \lambda_m]$. Враховуючи, що добуток вигляду (1) · (1) = (-1) · (-1), за аналогією одержимо:

$$\begin{cases} R_1 = L - 4(k - \lambda_1); \\ R_2 = L - 4(k - \lambda_2); \\ \dots \\ R_n = L - 4(k - \lambda_n); \\ \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 + \dots + \lambda_n n_n = k(k-1); \\ n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_n = L - 1, \end{cases} \quad (5)$$

де R_i – i -й рівень бічної пелюстки ПФАК, причому значення R_i має місце n_i раз. Аналіз виразу (5) показує, що λ_i також набуватиме n_i різних значень. Визначимо величину k :

$$\lambda_n = \lambda_{n-1} + Z_{n-1}; \quad \lambda_{n-1} = \lambda_{n-2} + Z_{n-2}; \dots, \quad (6)$$

де Z_j – будь-яке ціле число:

$$\lambda_2 = \lambda_1 + Z_1; \quad \lambda_1 = (R_1 - L + 4k)/4; \quad (7)$$

$$n_1 = L - n_2 - n_3 - \dots - n_n - 1; \quad (8)$$

$$n_3 = n_2 + y_2; \dots; \quad n_n = n_{n-1} + y_{n-1}, \quad (9)$$

де y_i – будь-яке ціле число.

Розв'язуючи систему (5) відносно k , одержимо:

$$\begin{aligned} & \frac{R_1 - L + 4k}{4} [L - (n-2)n_2 - (y_2 + \dots + y_{n-1}) - 1] + \\ & + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 \right) n_2 + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 + Z_2 \right) \times \\ & \times (n_2 + y_2) + \dots + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_m \right) \times \\ & \times [(m-1)n + (y_2 + y_3 + \dots + y_{m-1})] + \dots \\ & + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{n-1} \right) \times \\ & \times [(n-1)n_n + (y_2 + y_3 + \dots + y_{n-1})] - k^2 + k = 0. \quad (10) \end{aligned}$$

Після перетворень одержимо

$$\begin{aligned} L + [L(R_1 + 1) - R_1 + 4Z_1n_1 + 4(n_2 + y_2)(Z_1 + Z_2) + \dots \\ + 4[(n-1)n_2 + (y_2 + \dots + y_{n-1})] \times \\ \times (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{n-1})]^{1/2} = 2k. \quad (11) \end{aligned}$$

Вираз (11) визначає необхідні умови існування сигналів з n -рівневою ФК.

Як впливає з умови задачі, k повинне бути натуральним числом, отже, вираз у квадратних дужках у (11) повинен бути також натуральним числом Q , таким, за якого Q задовольняє умову $Q = \alpha \pmod{2}$. Тому

$$\begin{aligned} \{L(R_1 + 1) - R_1 + 4Z_1n_1 + 4(n_2 + y_2)(Z_1 + Z_2) + \dots \\ + 4[(n-1)n_2 + (y_2 + \dots + y_{n-1})] \times \\ \times (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{n-1})\} = Q. \quad (12) \end{aligned}$$

Вважаючи $L = 4x + \alpha$ і розв'язуючи (12) відносно n_2 , одержимо

$$\begin{aligned} n_2 = \frac{1}{4[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}]} \times \\ \times \{-R_1 + 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}]\} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] + \\ + 4R_1x - R_1\alpha - 4x - \alpha + Q^2 \}. \quad (13) \end{aligned}$$

Значення n повинні бути цілими. Вважаючи, що $n_2 = n_3 = n_4 = \dots = n_n$, $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \dots = \lambda_n$ для випадку рівномірної появи значень R_i функції кореляції та відповідає вимозі псевдовипадковості появи R_i , значення функції кореляції

$$n_2 = \frac{4}{4Z_1} [-R_1 + 4(R_1 + 1)x - \alpha(R_1 + 1) + Q^2].$$

Для знаходження решти значень n скористаємося виразами (8) і (9). При цьому зауважимо, що аналіз відомих систем сигналів показав, що найсприятливіший випадок синтезу квазіортогональних систем сигналів, з погляду отримання сигналів з хорошими кореляційними і структурними властивостями, є випадок рівних значень n_i . У загальному вигляді n_i дорівнює:

$$\begin{aligned} n_i = \frac{1}{4[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}]} \times \\ \{-R_1 + 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}]\} \times \\ \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] + 4R_1x - \\ - R_1\alpha - 4x - \alpha + Q^2 \} + \sum_{k=2}^{i-1} y_k. \end{aligned}$$

Враховуючи (14) і те, що n_i набувають цілих позитивних значень, визначимо область допустимих значень:

$$\begin{aligned} R_1 - 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}] \times \\ \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - 4R_1x + \\ + R_1\alpha + 4x + \alpha - \sum_{k=2}^{n-1} y_k \left/ \left\{ 4[(n-1)Z_1 + \dots + Z_{n-1}] \right\} \right. < Q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_1 - 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}] \times \\ \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - 4R_1x + \\ + R_1\alpha + 4x + \alpha - \sum_{k=2}^{n-1} y_k \left/ \left\{ 4[(n-1)Z_1 + Z_{n-1}] \right\} \right. < Q; \\ 4(4x + \alpha)[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - \\ - 4[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - \\ - R_1 + 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}] \times \\ \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] + 4R_1x - \\ - R_1\alpha - 4x - \alpha < Q. \quad (15) \end{aligned}$$

Якщо тепер визначити значення, то вираз (15) дозволяє знайти необхідні умови існування сигналів із заданими властивостями. Необхідні умови доста-

тньо ефективно звужують множини сигналів Z_i , які можуть мати n -рівневу функцію автокореляції із заданими значеннями R_i .

Достатні умови існування сигналів з n -рівневою ПФАК полягають в тому, щоб існувала різнева множина, збалансована на n -рівнів. У ході досліджень були розроблені методики побудови різних множин, збалансованих на n -рівнів.

Висновки і напрями подальших досліджень

Вирішення проблеми підвищення завадозахищеності, імітостійкості й скритності пов'язане з використанням множин сигналів, що задовольняють щонайменше дві вимоги:

– кожен сигнал даного ансамблю легко відрізняється від зсунутої в часі копії;

– кожен з сигналів даного ансамблю легко відрізняється від будь-якого іншого сигналу цієї множини.

Необхідні й достатні умови існування сигналів з n -рівневою функцією кореляції істотно спрощують процедури синтезу сигналів із заданими кореляційними властивостями.

Розроблений алгоритм побудови різних множин дозволяє синтезувати й досліджувати статистичні характеристики авто - і взаємокореляційних властивостей дискретних систем сигналів. Синтез і дослідження властивостей дискретних систем сигналів з n -рівневою функцією кореляції може здійснюватися в межах або тільки неінверсно й інверсно ізоморфних, або довільного поєднання тих та інших перетворень. При цьому забезпечується вибір будь-якої довільної тривалості сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Varakin L.E. Signals systems theory.- М.:Sov. Radio,1985.-304 p.(in Russian).
2. Stasev Y., Kuznetsov A., Sai V., Karpenko O. Discrete signals with Multi-Level Correlation Function // Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP-2010): Proceedings.- Kiev: NAU-Druk Publishing House-2010. – pp.176-179.
3. Niederreiter. H. Knapsack-Type Cryptosystems and Algebraic Coding Theory // PCIT.- 1986.- V.15. – P.19-34.
4. Sverdlik M.B. Optimal discrete signals.-М.:Sov.radio,1975.-200 p.(in Russian).
5. Prentice-Hall Signal Processing Series - Oppenheim A.V., Schaffer R.W. - Discrete-Time Signal Processing, 3rd Edition.Pearson //-2010. 1137 p.
6. Jean-Guillaume Dumas/ Foundations of Coding: Compression, Encryption, Error Correction Wiley, 2015. 376 p.
7. T.Eng and L.B. Milstein, "Coherent DS-CDMA perfomance in Nakagami multipath fading," IEEE Trans. Commun., Vol.43, No.1. pp 1134-1143,1995.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. В. Бараннік,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 12.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

Метод построения разностных множеств для синтеза дискретных сигналов с заданными свойствами

С. Ю. Стасев, С. С. Серов, В. В. Сапрунов

Предложен метод построения разностных множеств. Сформулированы необходимые и достаточные условия существования сигналов с заданными корреляционными, ансамблевыми и структурными свойствами. Показана взаимосвязь корреляционных и структурных свойств дискретных сигналов. Полученные математические выражения, и сформулированы необходимые и достаточные условия существования n -уровневой функции корреляции существенно упрощают процедуры синтеза сигналов с заданными корреляционными свойствами. Решение проблемы повышения помехозащищенности, имитостойкости и скритности связано с использованием множеств сигналов, удовлетворяющих требованиям. Каждый сигнал данного ансамбля легко отличается от сдвинутой во времени копии, каждый из сигналов данного ансамбля легко отличается от любого другого сигнала этого множества. Разработанный алгоритм построения разностных множеств позволяет синтезировать и исследовать статистические характеристики авто - и взаимокорреляционных свойств дискретных систем сигналов. Синтез и исследование свойств дискретных систем сигналов с n -уровневой функцией корреляции может осуществляться в пределах или только неинверсной и инверсной изоморфных или произвольного сочетания тех и других преобразований. При этом обеспечивается выбор любой произвольной длительности сигнала.

Ключевые слова: радиоэлектронная противодействие, система связи, дискретные сигналы, ансамблевые сигналы, помехозащищенность, имитостойкость.

Method of construction of different multiples for synthesis of discrete signals with proposed properties

S. Stasev, S. Serov, V. Saprunov

The method of construction of different sets is proposed. The necessary and sufficient conditions for the existence of signals with predetermined correlation and structural properties were formulated. The correlation and structural properties of discrete signals were shown. The mathematical expressions were obtained, and formulated the necessary and sufficient conditions for the existence of the n -level correlation function significantly simplify of the procedures for synthesizing signals with the given correlation properties. Solution the problem of increasing noise immunity, imitative stability and secrecy was associated with the use these sets of signals, which satisfy the requirements. Each signal of this ensemble is easy distinguish from a shifted copy in time, each of the signals of this ensemble is easily different from any other signal of this set. The developed algorithm of construction of different sets allows to synthesize and investigate the statistical characteristics of auto - and inter - correlation properties of discrete signal systems. Synthesis and investigation of the properties of discrete signal systems with n -level correlation function can be carried out within or only non-inverse and inverse isomorphic, or arbitrary combination of those and other transformations. In this case, the choice of any arbitrary duration of the signal is provided.

Keywords: electronic countermeasures, communication system, discrete signals, ensemble signals, noise immunity.

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Альошин С.П.	88	Лейченко К.М.	131	Свиридов А.С.	135
Артеменко А.М.	50	Лещинська І.О.	73	Семенов С.Г.	139
Бердніков А.Г.	93	Лещинський В.О.	73	Серов С.С.	180
Бородіна О.О.	88	Лисечко В.П.	165	Сколота С.В.	165
Буряк Т.В.	175	Ліпчанська О.В.	139	Скулиш М.А.	147
Варич В.В.	175	Ліпчанський М.В.	139	Слюсарь І.І.	143
Войтко О.В.	97	Макарова О.Є.	67	Сметанін К.В.	22
Волосюк В.К.	39	Маковейчук О.М.	26	Смицький О.В.	111
Гадецька С.В.	61	Мамчур Ю.В.	16	Смоляр В.Г.	143
Глуховець Ю.В.	175	Машков О.А.	16	Сокол Г.В.	175
Головка Г.В.	100, 103	Мірошниченко І.В.	126	Сотніков О.М.	9
Гребеннік І.В.	67	Мірошниченко М.В.	126	Стасєв С.Ю.	180
Гришманов Д.Є.	106	Москаленко А.О.	175	Струцінський О.В.	50
Донець В.В.	153	Нікіфорова К.М.	103	Танцюра О.Б.	9
Дубницький В.Ю.	61	Обіход Я.С.	165	Федоров А.В.	55
Жила С.С.	39	Орисенко О.В.	143	Феоктистова О.І.	83
Зіменко Л.М.	157	Остроумов І.В.	3	Фінаєв В.П.	55
Ічанська Н.В.	111	Пєвнєв В.Я.	131	Хижняк І.А.	26
Казаков Є.Л.	46	Подошвелєв Ю.Г.	111	Худов Г.В.	26
Казаков О.Є.	46	Приставка Ю.В.	78	Чалий В.В.	55
Качуровський Г.М.	165	Прогонний О.М.	165	Черницька І.О.	143
Книш В.В.	143	Рахімі Я.	83	Чорна О.С.	67
Кобилін А.М.	61	Рвачова Н.В.	175	Шахова Є.В.	93
Коваленко О.В.	116	Решітник В.М.	46	Шилов Ф.І.	147
Колтунов М.Г.	100	Рибаченко К.А.	111	Шматков С.І.	153
Коржов А.М.	50	Самофал А.С.	100	Шостак І.В.	83
Костянець О.В.	50	Сапрунов В.В.	180	Яровий О.В.	33
Кучук Н.Г.	153	Сафарян А.	147		

Наукове видання

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 3 (49)

Відповідальна за випуск *К. С. Козелкова*Технічний редактор *Т. В. Уварова*Коректор *О. В. Морозова*Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук*Оформлення обкладинки *І. В. Ільїна*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.

Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 23,0. Тираж 150 прим. Зам. 703-18

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (066) 706-18-30
Полтавський національний технічний університет імені Юрія КондратюкаВіддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 2480000000106167 від 08.01.2009.61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. (057) 778-60-34
e-mail: bookfabrik@mail.ua