

*Слюсарь І.І., к.т.н., доцент, доцент кафедри,
Слюсар В.І., д.т.н., професор, професор кафедри,
Смоляр В.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедри,
Омаров М.І., студент,
Хоменко Р.В., студент,
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка*

ШЛЯХИ УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМ ТРАНКІНГОВОГО ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ

В роботі розглянуті особливості побудови перспективних транкінгових систем радіозв'язку (ТСР). На основі проведеного аналізу характеристик та властивостей існуючих систем визначені основні недоліки та обмеження застосування при експлуатації в різних умовах. Приведена класифікація зазначених систем. В ході досліджень визначені пріоритетні напрями подальшого розвитку даних систем. Наведені результати математичного моделювання основних параметрів перспективної базової станції ТСР в умовах забезпечення режиму мультистандартності.

Ключові слова: *ТСР, ЦДУ, ЦАР, DBF, N-OFDM, OFDM, SDR, TDMA, TETRA.*

Вступ

Згідно [1], в рамках створення Національної системи мобільного зв'язку державних органів передбачається впровадження сучасних цифрових систем транкінгового радіозв'язку (ТСР) в інтересах систем екстреного диспетчерського радіозв'язку. На даний час в Україні в основному використовуються аналогові радіостанції ТСР, переважно виробництва часів

СРСР, які за своїми технічними характеристиками не забезпечують функції захисту інформації, передачу даних, GPS-навігації та ін.

За рівнем своїх функціональних можливостей системи TETRA (TErrestrial Trunked RAdio) з часовим множинним доступом (Time Division Multiple Access, TDMA) [2] і APCO25 з частотним множинним доступом (Frequency Division Multiple-Access, FDMA) [3] перебувають на верхньому рядку класифікації ТСР. У кожному з цих стандартів загальна кількість пропонованих функцій передачі голосу/даних суттєво перевищує 100. Великою перевагою цифрових ТСР є можливість сумісної роботи з існуючим парком аналогових радіостанцій, що дає змогу здійснювати їх поетапну побудову. При цьому, існує можливість тонкої адаптації системних рішень під потреби замовника за допомогою додаткових програмних продуктів, наприклад, диспетчерських додатків та ін. В даному сенсі, технології TETRA і APCO25 (Association of Public Safety Communications Officials International), які вже багато років використовуються правоохоронними органами країн світу, є найбільш успішними, що відбулися.

В свою чергу, зазначені стандарти ТСР в технологічному плані значно відстають від інших телекомунікаційних систем передачі даних, наприклад, систем мобільного зв'язку 4G/5G [4], уніфікованих комунікацій [5], систем оптичного доступу [6] та ін. Як наслідок, основні елементи інфраструктури ТСР, в т. ч. й базові станції (БС), повинні будуватись на сучасних схемо-технічних рішеннях.

Основна частина

Зазвичай, для систематизації ТСР використовують кілька класифікаційних ознак: метод передачі мовної інформації; кількість зон; метод об'єднання БС у багатозонових системах; тип багатостанційного доступу; спосіб пошуку та призначення каналу; тип каналу керування; спосіб утримання каналу.

Проведений аналіз свідчить, що аналогові ТСР одержали значне поширення. Однак, на даний момент розвиток цих систем повністю припинився через масовий перехід на цифрові технології. Розвиток цифрових ТСР обумовлений низкою переваг перед аналоговими системами:

- більша спектральна ефективність за рахунок застосування складних видів модуляції сигналу та низько-швидкісних алгоритмів перетворення мови;
- підвищена ємність систем зв'язку;
- вирівнювання якості мовного обміну по всій зоні обслуговування БС за рахунок застосування цифрових сигналів у комбінації із завадостійким кодуванням.

Крім того, цифрові ТСП у порівнянні з аналоговими забезпечують переваги за рахунок реалізації вимог по підвищеній оперативності та безпеки зв'язку, надання широких можливостей по передачі даних, більш широкого спектру послуг зв'язку (включаючи специфічні послуги зв'язку для реалізації спеціальних вимог служб суспільної безпеки), можливостей організації взаємодії абонентів різних мереж. Великою перевагою цифрових ТСП є можливість сумісної роботи з існуючим парком аналогових радіостанцій, що дає змогу здійснювати їх поетапну побудову.

Як відомо, усі цифрові ТСП є системами з виділеним каналом керування, а розрізняються насамперед способом доступу: FDMA або TDMA. З метою реалізації [1], та враховуючі те, що специфікація APCO Phase 2 орієнтована на спільне застосування FDMA і TDMA, а також поширеність в Україні ТСП TETRA (в т. ч. фірм-інсталяторів зазначених мереж) і відкритість стандарту, надалі в роботі розглядається ТСП TETRA, що використовує TDMA. Стандарт TETRA припускає використання діапазону частот від 150 до 900 МГц. При цьому, TETRA Release 2 забезпечує $38,4 \div 691,2$ кбіт/с, а радіоінтерфейс дозволяє реалізувати QAM-64. Аналіз варіантів використання методу TDMA на прикладі TETRA дозволяє визначити його переваги та недоліки в ТСП.

Для визначення характеристик та параметрів перспективної БС ТСП TETRA в роботі виконана порівняльна оцінка ТСП Motorola Dimetra IP [7], Rohill Tetranode [8] і DAMM Tetraflex [9]. З точки зору повноти функціоналу пріоритетними є ТСП DAMM TetraFlex. Однак, при необхідності побудови систем загальної безпеки або об'єднаних ТСП кількох силових структур на державному рівні – перевагу слід віддати рішенням на базі Motorola Dimetra IP

Scalable.

Під час аналізу параметрів радіотракту TSP TETRA встановлено, що зона покриття БС TETRA менше у 2÷3 рази, ніж у БС аналогових TSP або DMR (Digital Mobile Radio). Тому система TETRA вимагає встановлення в 3÷5 разів більшої кількості сайтів для покриття аналогічної території.

Сервіс удосконаленої служби передачі даних (TETRA Enhanced Data Service, TEDS) оптимізований на ефективне використання частотного спектра та припускає використання різної ширини каналу та типу модуляції залежно від умов поширення сигналу. TEDS використовує 8 несучих частот на кожні 25 кГц, тобто відповідно 8, 16, 32 і 48 несучих на канали шириною 25, 50, 100 і 150 кГц. Кожна несуча забезпечує швидкість передачі 2400 символів на секунду, а сумарна символна швидкість залежить від загальної кількості несучих. Такий метод, за рахунок низької швидкості на кожній несучій, забезпечує стійкість модуляції до часової дисперсії й, отже, дозволяє уникнути необхідності застосування адаптивного еквалайзера. На жаль, дотепер, через обмеженість частотного спектра, застосовуваного в мобільному радіозв'язку, розгортання радіомереж з підтримкою сервісу TEDS обмежене використанням каналів шириною не більш 50 кГц.

Підвищення пропускної здатності БС TSP можливе за рахунок використання нових варіантів TDMA, що базуються на основі сучасних технологій та методів модуляції з високою спектральною ефективністю. Як наслідок, в роботі запропоновано кілька підходів щодо вирішення даної задачі:

- отримання додаткового операційного підсилення за рахунок модифікації алгоритмів квадратурної амплітудної модуляції (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) [10];

- робота з існуючим парком обладнання стандарту TETRA;

- введення режиму множинного доступу на основі ортогональної частотної дискретної модуляції (Orthogonal Frequency Division Multiple Access OFDMA);

- реалізація ЦОС за гібридною схемою OFDM/TDMA або OFDMA/TDMA;

- забезпечення мультистандартних режимів роботи, наприклад: з DMR, APCO25 та ін.

В даному сенсі, для підвищення пропускної здатності TSP стандарту TETRA для перспективної БС пропонується використовувати замість однієї несучої з QAM багатопозиційний сигнал типу OFDM [11]. Оскільки при застосуванні OFDM інформаційний потік розподілений на велику кількість низько-швидкісних підканалів, то довжина тактового інтервалу для кожної несучої визначається істотно більше типової затримки сигналів при багатопробному розповсюдженні радіохвиль. Це перетворює підданий селективному федингу широкопосмуговий канал з однією несучою на незалежно федингуючі вузькосмугові підканали з частотним ущільненням.

Перед визначенням основних параметрів ЦОС в БС з OFDM в рамках TSP TETRA доцільно сформулювати початкові дані, які спираються на вимоги стандарту TETRA. Враховуючи тривалість одного тайм-слоту (Time Slot, TS) 14,167 мс і кількість переданої інформації 510 модуляційних біт, технічна швидкість передачі складає 35,99915 кбіт/с (≈ 36 кбіт/с). Для виявлення помилок при передачі в каналі радіозв'язку та їх виправлення, в каналному кодуванні застосовуються технології Forward Error Correction (FEC) і Cyclic Redundancy Check (CRC) у вигляді 4-х процедур: блочного кодування, згорткового кодування, перемежування та шифрування, після чого формуються інформаційні канали. Один радіоканал займає смугу 25 кГц. Режим TEDS використовує 8 несучих частот на кожні 25 кГц, тобто відповідно 8, 16, 32 і 48 несучих на канали шириною 25, 50, 100 і 150 кГц. Однак, як вже зазначалося, на практиці розгортання радіомереж з підтримкою сервісу TEDS обмежене використанням каналів шириною не більш 50 кГц. Таким чином, в якості вихідних положень доцільно прийняти наступне.

- абонентські термінали TETRA підключаються до БС в режимі TDMA;
- тривалість одного TS дорівнює 14,167 мс;

- затримка сигналу може складати $7 \div 10$ мкс;
- режим TEDS використовує 8 несучих на канал смугою 25 кГц.

Надалі, слід сформулювати вимоги до основних параметрів БС з OFDM.

1. БС з OFDM повинна підтримувати стандартні абонентські термінали TETRA в режими TDMA. Це означає, що OFDM з модифікованим алгоритмом QAM реалізується в межах одного TS для абонентських терміналів з підтримкою відповідної удосконаленої ЦОС. Якщо всі термінали підтримують запропонований підхід, то може реалізовуватись режим доступу OFDM/TDMA або OFDMA, що дає додаткове підвищення пропускної здатності ТСР.

2. Відповідно до TEDS, мінімальна кількість несучих підканалів сигналу OFDM повинна складати: $M_{\min} = 8$.

3. Кількість символів OFDM, які формують кадр дорівнює цілому числу N .

Враховуючі вищезначене, розраховуються параметри сигналу БС з OFDM.

1. Для розрахунку максимальної кількості несучих підканалів (відповідно – розмірність операції швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)) покладемо тривалість символного періоду OFDM (або періоду ШПФ) рівною довжині TS, тобто, початково $T_u = 14,167$ мс, тоді:

$$M_{\max} = \frac{1}{T_u} = \frac{1}{14,167 \text{ мс}} = 283,34 .$$

Зазвичай, розмірність ШПФ обирається відповідно до алгоритму Кулі-Т'юкі (в даному випадку, $M_{\max} = 2^N$) [12]. Несприятливим наслідком популярності зазначеного алгоритму є те, що на основі параметрів алгоритмів ШПФ стали обиратись параметри обладнання замість того, щоб це мало зворотну послідовність. Насправді ж, ефективні алгоритми ШПФ існують для практично будь-яких довжин перетворення. Одним з них є алгоритм ШПФ Виноградова [13]. Він більш ефективний в обчислювальному відношенні, чим алгоритм ШПФ з основою 2. Однак, прикладів практичного його використання майже немає внаслідок виняткової складності реалізованої нерегулярної

структури обчислень. Виходячи з цих міркувань визначається кількість несучих підканалів OFDM – $M_{\max} = 256$.

2. Тривалість захисного інтервалу T_g може становити 1/4, 1/8, 1/16 або 1/32 від тривалості OFDM-символу, але не менше $7 \div 10$ мкс. При цьому, зменшувати T_g менше 1/16 є вважається недоцільним.

Як наслідок, змінюючи значення T_g і кількість несучих підканалів в межах від $M_{\min} = 8$ до $M_{\max} = 256$, визначаємо кількість OFDM-символів в одному кадрі, тривалість якого не повинна перевищувати довжину TS. Приклад результатів розрахунків наведений в табл. 1. На практиці, з отриманих N символів OFDM необхідно виділити частину під пілот-сигнали ($\approx 6,25\%$ від загальної кількості), а також виключити крайові підканали ($\approx 18,75\%$ від загальної кількості) у разі наявності в них амплітудно-частотних спотворень.

Таким чином, для кратності тривалості захисного інтервалу 1/16 з точки зору кількості символів OFDM, доцільно обрати систему параметрів з кількістю несучих від 8-ми до 32-ох. Сумарна швидкість передачі даних розраховується після вибору кодової швидкості та алгоритму QAM.

Таблиця 1

Параметри цифрової обробки сигналів OFDM

Параметр сигналу OFDM	Кратність тривалості захисного інтервалу 1/16					
	256	128	64	32	16	8
Кількість підканалів	256	128	64	32	16	8
Δf , кГц	0,097656	0,195313	0,390625	0,78125	1,5625	3,125
T_u , мс	10,24	5,12	2,56	1,28	0,64	0,32
T_g , мс	0,64	0,32	0,16	0,08	0,04	0,02
$T_s = T_g + T_u$, мс	10,88	5,44	2,72	1,36	0,68	0,34
Розрахована кількість символів OFDM	1,3	2,6	5,2	10,42	20,83	41,67
N символів OFDM в одному кадрі	1	2	5	10	20	41

В системах з OFDM на використання процедури перетворення Фур'є накладається обмеження, яке обумовлене відносно великими бічними пелюстками частотної характеристики фільтру ШПФ. Внаслідок цього може проявитися ефект міжканальної інтерференції, коли частоти несучих сигналів з певних причин неконтрольовано зсуваються від максимуму амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) фільтру ШПФ. Таким чином, одним з істотних недоліків методу OFDM є те, що частотне ущільнення обмежене шириною смуги синтезованих фільтрів ШПФ [14].

Враховуючі те, що QAM використовується як в сучасних TSP TETRA, так й в якості модуляційних символів OFDM, для TSP в роботі запропонована модифікація алгоритмів QAM, що зводиться до застосування схеми модуляції з «обертаним» сигнальним сузір'ям [15]. Такий підхід забезпечує додаткове операційне підсилення.

Для перспективної БС, враховуючі вимоги щодо забезпечення можливості роботи з існуючим парком обладнання стандарту TETRA, уніфікації та відкритості щодо подальших модифікацій, а також реалізації мультистандартних режимів, в якості базової визначена технологія програмної конфігурації обладнання (Software-Defined Radio, SDR) [16]. На її основі розроблені схемні рішення приймального та передавального трактів перспективної БС з OFDM.

За аналогією з DVB-T2, доцільно забезпечити роботу терміналів абонентів в режимі MISO (множинний вхід – одиночний вихід) з використанням схеми кодування Аламоуті, тобто приймач обробляє сигнал від двох передавальних антен, або двох БС (відповідно, якщо він знаходиться в зоні їх дії) [17]. Як відомо, MISO – це частковий випадок MIMO – технології передачі даних n антенами та їх прийому m антенами. Суть методу полягає в тому, що для передачі сигналу використовується не одна, а відразу кілька антен, віддалених одна від одної.

Як наслідок, розвитком цього підходу є введення режиму MIMO [18], який досить вдало використовується в безпроводових LAN (802.11n та ін.).

Ще одним напрямком, як й в 5G, є застосування неортогональних сигналів, наприклад, неортогональної OFDM (N-OFDM) [19]. Такий підхід деякою мірою компенсує недоліки OFDM. На практиці, для підвищення заводозахищеності TCP процедуру N-OFDM, подібно OFDM, доцільно використовувати спільно зі схемами внутрішнього та зовнішнього канального кодування для корекції або виявлення похибок.

Досить перспективним для БС TCP є застосування технології цифрового діаграмоутворення (ЦДУ) на основі цифрових антенних решіток (ЦАР) [20]. Ключова особливість ЦАР – цифрове формування променів діаграми спрямованості (ДС) антени. В цілому, телекомунікаційна система з ЦДУ на базі ЦАР має можливості для ефективного вирішення наступних завдань:

- поліпшення відношення сигнал/завада завдяки формуванню «нулів» ДС у напрямках завадових сигналів, у тому числі від сусідніх бортових та наземних станцій, навіть у головних пелюстках ДС;

- придушення завадових сигналів, що виникають у разі багатопробеневого поширення радіохвиль, а також істотне зниження глибини федингової модуляції;

- досягнення максимальної ефективності систем множинного доступу з кодовим (Code Division Multiple Access, CDMA), просторовим ущільненням (Space Division Multiple Access, SDMA); FDMA і TDMA;

- інтеграція в єдину інформаційну систему різних за функціональним призначенням підсистем, а саме радіонавігації, радіозв'язку тощо;

- підвищення інтенсивності корисних сигналів шляхом фокусування максимумів ДС у напрямках рухомих кореспондентів;

- вирішення проблеми електромагнітної сумісності.

На даний час, при побудові БС використовують конструктиви на основі CompactPCI. Альтернативою цьому є більш сучасні рішення, що впроваджують PCI Express [21].

Висновок

Таким чином, зазначені пріоритетні напрямки розвитку базових елементів

інфраструктури ТСР дозволять значно розширити номенклатуру сервісів та послуг, а також задовольнити існуючі вимоги при створенні Національної системи мобільного зв'язку державних органів. Крім того, це скоротить суттєве відставання в технологічному плані ТСР від передових телекомунікаційних систем передачі [22, 23].

Література:

1. Про затвердження плану першочергових заходів щодо створення Національної мережі мобільного зв'язку державних органів на 2015 рік / Розпорядження КМУ від 20 травня 2015 р. № 523-р. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/523-2015-%D1%80>.
2. *Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Release 2; Designer's Guide; TETRA High-Speed Data (HSD); TETRA Enhanced Data Service (TEDS) [Electronic resource] / ETSI TR 102 580 V1.1.1 (2007-10). Technical Report. – Last access: http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102500_102599/102580/01.01.01_60/tr_102580v010101p.pdf.*
3. *APCO P25 (Project 25) [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/APCO_P25.*
4. Слюсарь І.І. *Визначення пріоритетного ряду характеристик системи 5G на основі методу аналізу ієрархій.* / І.І. Слюсарь, В.І. Слюсар, Р.В. Кулик. // *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: матеріали 6-ї міжнародної науково-технічної конференції.* – Полтава: ПолтНТУ; Баку: ВА ЗС АР; Кіровоград: КЛІ НАУ; Х.: ДП «ХНДІ ТМ», 21-22 квітня 2016 р. – С. 59.
5. Слюсарь І.І. *Трансфер технологій уніфікованих комунікацій в інтересах навчального процесу та управління вищим навчальним закладом* / І.І. Слюсарь, Ю.В. Уткін, О.І. // *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* – Х.: УкрДАЗТ, 2013. – № 5. – С. 39-43.
6. *Converged Solutions for Next Generation Optical Access / I. Sliusar, V. Slyusar, S. Voloshko, V. Smolyar // IEEE Second International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PICS&T2015).* – Kharkiv. – October 13-15, 2015. – P. 149-152.
7. *Цифровая транкинговая система радиосвязи Motorola Dimetra IP Compact [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.sagatelecom.ru/radiosystems/digital_systems/dimetra_ip_compact.php.*
8. *TetraNode access networks [Electronic resource] / Rohill. – Last access: <http://www.rohill.nl/products/access-networks>.*

9. *The power of true scalability with a TETRA system [Electronic resource] / Damm Cellular Systems A/S. – Last access: <http://www.damm.dk/products/tetraflex-system-/>.*
10. *Гласман К. Методы передачи данных в цифровом телевидении. Ч. 3 [Электронный ресурс] / К. Гласман. – Режим доступа: <http://www.ctspi.ru/TechSupp/DigiTV/Methods.htm>.*
11. *Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А. Генка, В.Ф. Олейник, Ю.Д. Чайка., А.В. Бондаренко. – К.: ЕКМО, 2009. – 672 с.*
12. *Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1989. – 448 с.*
13. *Нуссбаумэр Г. Быстрое преобразование Фурье и алгоритмы вычисления сверток. / Г. Нуссбаумэр. – М.: Радиосвязь, 1985. – 248 с.*
14. *Пат. 47918А Україна, МПК H04J 1/00 (2002.07). Спосіб частотного ущільнення вузькосмугових інформаційних каналів / Слюсар В.І., Смоляр В.Г., Слюсар І.І.; заявники та власники Слюсар В.І., Смоляр В.Г., Слюсар І.І. – № и 2001117512; заявл. 05.11.2001; опубл. 15.07.02, Бюл. №7.*
15. *Шахнович И. DVB-T2 – новый стандарт цифрового телевизионного вещания / И. Шахнович. [Электронный ресурс] // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес – 2009. – № 6. – Режим доступа к журналу: http://www.electronics.ru/files/article_pdf/0/article_258_849.pdf.*
16. *Слюсар И.И. Рынок программируемых логических интегральных схем расширяет свою номенклатуру. / И.И. Слюсар, В.И. Слюсар // Інформаційні інфраструктури та технології. – №1. – 2009. – С. 40-44.*
17. *ETSI EN 302 755 v1.3.1 (2012–04) Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2) / ETSI. [Electronic resource] – Last access: http://telcogroup.ru/files/materials-pdf/DVB_standards/DVBT/a122_DVB-T2_spec.pdf.*
18. *Слюсар В.И. Системы ММО: принципы построения и обработка сигналов. / В.И. Слюсар. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 8. – С. 52-58.*
19. *Слюсар В.И. Неортогональное частотное мультиплексирование (N-OFDM) сигналов. Ч. 1. / В.И. Слюсар. // Технологии и средства связи. – 2013. – № 5. – С. 61-65.*
20. *Вишневский В.М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В.М. Вишневский. – М.: Техносфера, 2005. – С. 498-569.*
21. *Слюсар В.И. Внедрение PCI Express в CompactPCI - попытка № 2. / Слюсар В.И., Троцько А.А. // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2010. – № 7. – С. 72-81.*
22. *Базова станція транкінгового зв'язку з OFDM / І.І. Слюсарь, В.І. Слюсар, В.Г. Смоляр, М.І. Омаров. // Тези доповідей четвертої міжнародної науково-технічної*

конференції «Проблеми інформатизації», 3-4 листопада 2016 р. – ЧДТУ, ВА ЗС АР, УТіГН, ПНТУ, 2016 р. – С. 64.

23. Цифровий сегмент базової станції транкінгового зв'язку з ЦДУ / В.Г. Смоляр, В.І. Слюсар, І.І. Слюсарь, Р.В. Хоменко. // Тези доповідей четвертої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації», 3-4 листопада 2016 р. – ЧДТУ, ВА ЗС АР, УТіГН, ПНТУ, 2016 р. – С. 57-58.