

М. Ю. Заліський, О. А. Щербина, Л. Ю. Терещенко, А. О. Осіпчук, О. Б. Жарова, П. О. Станко  
Національний авіаційний університет, Київ, Україна

## МЕТОД ПОБУДОВИ ТІНЬОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ОБ'ЄКТІВ КОНТРОЛЮ РЕНГЕНІВСЬКИХ СИСТЕМ АВІАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ

**Анотація.** Стаття присвячена розробці метода побудови тіньових зображень об'єктів контролю рентгенівських інтроскопів та аналізу його застосування для розпізнавання небезпечних та заборонених предметів на зображеннях багажу. Відомо, що безпека авіації значним чином визначається заходами з забезпечення авіаційної безпеки. Для цього використовуються радіоелектронні системи та комп'ютеризовані комплекси доглядової техніки. Це обладнання включає рентгенівські інтроскопи, металодетектори та металошукачі, сканери тіла, газоаналізатори тощо. Обладнання доглядової техніки використовується для виявлення не-безпечних та заборонених предметів у пасажирів та в їхньому багажу. Однією із основних проблем при цьому слід вважати високу ймовірність хибної тривоги під час виявлення небезпечних предметів рентгенівськими системами. У деяких випадках ця ймовірність може складати 0,3, що негативно впливає на пропускну здатність пасажиропотоку аеропортів. З метою усунення вказаного недоліку в цій статті наводиться детальний опис нових технологій виявлення небезпечних предметів на основі використання проєкційних тіньових зображень об'єктів контролю. Запропонований метод побудови тіньових зображень ґрунтується на використанні правила подібності трикутників, теореми Піфагора, теореми синусів і косинусів та формул для визначення тригонометричних функцій кутів прямокутного трикутника. Пояснення методу отримання тіньових зображень виконується на прикладі об'єкту контролю у вигляді циліндра. При цьому спочатку наводиться стандартна методика визначення математичної моделі тіні у одній площині сканування. Далі використовуються розроблений метод сканування, який передбачає прямий та обернений перехід до циліндричної та декартової систем координат. Отримані математичні моделі тіньових зображень простої форми використовуються для побудови моделей складної форми, які можуть вважатися моделями заборонених та небезпечних об'єктів доглядового контролю. Метод отримання тіньових зображень є складовою методичного базису для синтезу спектрального виялювача. Алгоритм виявлення передбачає знаходження просторового перетворення Фур'є від тіньового зображення з подальшою згортою зі спектром маски шуканого забороненого чи небезпечного предмету. Запропонований виялювач використовує правило прийняття рішення на основі критерію Неймана-Пірсона. У статті виконано аналіз результатів моделювання виялювача для розпізнавання пістолету на зображеннях багажу. Для аналізу ефективності виявлення розраховано відповідну характеристику виявлення. Аналіз довів ефективність спектрального виялювача з точки зору статистичних характеристик. При цьому під час розпізнавання пістолету ймовірність правильного виявлення складає 0,99997, а ймовірність хибної тривоги – 0,01. Результати дослідження можуть бути використані для автоматизації процесів догляду пасажирів та багажу.

**Ключові слова:** авіаційна безпека, рентгенівські інтроскопи, тіньові зображення, обробка зображень, спектральний виялювач, критерій Неймана-Пірсона.

### Вступ

Забезпечення безпеки є головним завданням для цивільної, військової та комерційної авіації. Безпека визначається як стан, за якого ризики авіаційних подій знижуються та контролюються до прийняттого рівня [1]. Авіаційну безпеку можна розглядати як динамічний стохастичний процес [2], який залежить від багатьох факторів, включаючи організаційну структуру аеропорту, надійність авіаційного обладнання, людський фактор, експлуатаційні чинники, умови навколишнього середовища тощо.

Авіаційна безпека є важливою складовою безпеки авіації. Метою діяльності служб авіаційної безпеки є забезпечення авіаційної безпеки, ефективності роботи аеропортів цивільної авіації шляхом здійснення заходів щодо захисту від актів незаконного втручання відповідно до чинних правил, рекомендованої практики та процедур [3].

На основі системного підходу та аналізу Міжнародна організація цивільної авіації (ICAO) визначила основні загрози авіаційній безпеці:

- захоплення повітряних суден терористами та іншими злочинними елементами та диверсійні акти;
- незаконне перевезення небезпечних вантажів;

– небезпеки під час польотів повітряного судна з вини агресивних або психічно невірноважених пасажирів;

– застосування терористами ракет класу «земля-повітря»;

– незаконне перевезення ядерних та радіоактивних речовин;

– кібертероризм.

Основним завданням служби авіаційної безпеки є виявлення небезпечних і заборонених об'єктів під час перевірки пасажирів і багажу [4]. Для цього персонал служби авіаційної безпеки використовує різне обладнання: рентгенівську доглядову систему, сканери тіла, металодетектори, детектори рухомих іонів, детектори слідів вибухових речовин. Сучасні аеропорти використовують від трьох до п'яти рівнів догляду багажу. Догляд пасажирів здійснюється лінійним режимом. Рентгенівська доглядова система надає інформацію про внутрішню структуру предметів багажу та дає можливість виявити вибухові речовини, наркотики, вогнепальну, холодну зброю та інші небезпечні та заборонені предмети [5].

**Аналіз літератури та постановка задачі.** Відповідно до сучасних рекомендацій по будівництву аеропортів, передбачається, що весь багаж прохо-

дить автоматичний догляд за допомогою рентгеновських інспекційних систем. Однак на жаль, висока достовірність виявлення небезпечних предметів і матеріалів (ймовірність правильного виявлення вище 0,99) також супроводжується високими рівнями ймовірності помилкової тривоги (ця ймовірність приблизно дорівнює 0,15...0,3) [5, 6].

Основними причинами досить високих рівнів ймовірності помилкових тривог є:

1. Залежність характеристики виявлення від якості отриманих зображень [7].

2. Недоліки у визначенні ймовірнісних характеристик технологій візуалізації та використовуваних алгоритмів розпізнавання небезпечних та заборонених об'єктів під час рентгеновського догляду [8].

3. Людський фактор [9].

4. Несправності, збої та відмови обладнання [10].

Використання автоматизованих технологій виявлення та розпізнавання небезпечних і заборонених об'єктів у процесі перевірки дозволяє операторам з авіаційної безпеки зосередитися на аспектах перевірки, а система виконує функції сканування, аналізу та виявлення заданих об'єктів у багажі [11]. У статті [12] представлено метод автоматизованого виявлення небезпечних об'єктів з використанням адаптованої неявної форми моделі сканування. Цей підхід використовує візуальний словник для виявлення небезпечних і заборонених об'єктів. Автори демонструють достатній рівень ймовірності помилкових тривог при виявленні бритв і сюрікенів (0,02 і 0,06 відповідно), але під час виявлення пістолетів рівень помилкових тривог високий (ймовірність дорівнює 0,18).

Сучасним інструментом розпізнавання небезпечних і заборонених об'єктів є використання глибоких згорткових нейронних мереж (CNN). Стаття [13] досліджує попередньо навчену CNN на основі парадигми навчання за перенесенням. Запропонований підхід показав ефективне виявлення пістолетів з низькою ймовірністю помилкової тривоги (в діапазоні 0,0021 ... 0,024 залежно від параметрів CNN). Аналіз ймовірнісних характеристик для виявлення різних об'єктів за допомогою CNN наведено в [14]. Існують деякі вдосконалення та модифікації CNN, як показано в [15]. Загалом CNN є ефективною та надійною технікою виявлення небезпечних і заборонених об'єктів [16], але вона потребує значної обчислювальної потужності.

Проведений аналіз показав, що рентгеновська система заснована на прямому методі візуалізації. Прямі методи візуалізації складаються з наступних операцій:

- опромінення об'єкту джерелом рентгеновського випромінювання;
- приймання розсіяного та послабленого випромінювання;
- перетворення отриманого випромінювання в електричний сигнал та обробка сигналу;
- перетворення електричного сигналу в оптичний [5].

Друга операція пов'язана з реконструкцією тінювих зображень. Тінюве зображення об'єкта контролює собою тіню об'єкта в рентгеновському діапазоні. Оскільки різні об'єкти поглинають рентгеновське випромінювання, тінюве зображення показує розподіл амплітуди рентгеновського випромінювання на екрані детектора після його проходження крізь об'єкт контролю.

Аналіз літератури також показує, що реконструкція тінювих зображень є перспективним напрямком, який, зокрема, спрямований на підвищення ефективності роботи систем рентгеновського скринінгу.

Математичний опис послабленого випромінювання об'єктів, які перевіряються за допомогою системи рентгеновського догляду, можна надати наступним чином:

$$\varphi(x, y) = \Psi(\vec{F}, \vec{G}, \vec{P}, \vec{I}), \quad (1)$$

де  $x$  і  $y$  – координати (абсцисата ордината) на екрані приймача;  $\vec{F}$  – параметр форми, який задає складність об'єкта контролю (може бути простою або складною);  $\vec{G}$  – геометричні параметри об'єкта контролю, які задають числові значення його розмірів;  $\vec{P}$  – фізичні параметри об'єкту контролю (щільність, коефіцієнт поглинання, коефіцієнт розсіювання та інші);  $\vec{I}$  – параметри нахилу об'єкта контролю відносно осей координат.

**Метою цієї статті** є математичний опис процесу визначення ослабленого випромінювання на детекторах рентгеновського інтроскопу та аналіз можливості використання цих математичних залежностей для вирішення задачі розпізнавання небезпечних і заборонених об'єктів.

### Метод реконструкції тінювих зображень

Узагальнена структура доглядових систем включає джерела випромінювання, об'єкт контролю та приймальну частину. Приймальна частина складається з обладнання для обробки зображень і відображення інформації для операторів служби авіаційної безпеки. У блоці обробки формується інформація про тінюве зображення об'єкту контролю [10].

Об'єкт контролю розташовують між джерелом випромінювання та екраном на певній відстані [17]. У кожній точці екрана фіксується значення параметра випромінювання, що пройшло через об'єкт (амплітуда, поляризація та інші). Кожному значенню цього параметра відповідає певна яскравість оптичного зображення. У загальному випадку розподіл яскравості оптичного зображення також є тривимірною функцією і залежить від уявних координат  $(x, y, z)$ . У наступних аналітичних моделях розподіл яскравості оптичного зображення задається аналогічно просторовому розподілу реального параметра. Оскільки просторовий параметр є постійною величиною в межах певного об'єму, функція яскравості оптичного зображення в межах цього певного об'єму також є величиною постійною. Цей об'єм обмежений двовимірною функцією  $\varphi'(x, y)$ . Отримане оптичне зображення виводиться на монітор рентгеновської

доглядової системи і тому є двовимірним. Координати задають певну точку на екрані монітора. Отже, фактично яскравість зображення визначається двовимірною функцією  $\varphi'(x, y)$ .

Загалом, для підвищення ефективності роботи доглядової системи необхідно постійно вдосконалювати структуру обробки даних, оскільки:

- а) різноманітність об'єктів контролю постійно збільшується;
- б) об'єктивно виникають шуми різного походження;
- в) збільшується обсяг повітряного транспорту;
- г) скорочується час прийняття рішення щодо виявлення заборонених об'єктів [5].

В цих умовах актуальним стає питання використання нових теоретичних результатів у галузі обробки даних, зокрема статистичних і фільтраційних методів обробки сигналів. На етапі синтезу та аналізу структур обробки даних доцільно використовувати методи та засоби електронного та статистичного моделювання [18].

На рис. 1 наведено узагальнену структуру операторів обробки даних для рентгенівських скринінгових систем.



Рис. 1. Узагальнена структура операторів обробки даних для рентгенівських систем

Узагальнений методичний підхід до побудови тінювих зображень предметів різної форми включає наступні етапи:

1. Вибір типу джерела випромінювання та аналіз його фізичних особливостей, а також методу сканування. Наприклад, якщо джерело точкове, то хвиля має сферичний фронт, якщо джерело лінійне, то має циліндричний фронт.

2. Аналіз геометричних особливостей об'єкта контролю та його розташування відносно джерела випромінювання, формування векторів вхідних даних (розміри, відстань від джерела до об'єкта контролю, відстань від об'єкта контролю до екрана тощо).

3. Аналіз розповсюдження електромагнітного випромінювання через об'єкт контролю до приймачів (екран, детектори). Ці явища підкоряються рівнянню Бера-Ламберта та законам геометрії.

4. Формування тінювого зображення та його кодування в псевдоколірній шкалі.

Згідно з рівнянням Бера-Ламберта інтенсивність  $|E|^2$  випромінювання, що поширюється в однорідному середовищі ( $\alpha = \text{const}$ ), описується наступним виразом:

$$|E|^2 = E_0^2 \exp(-\alpha\Delta), \quad (2)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поглинання матеріалу об'єкта контролю;  $\Delta$  – відстань, на яку рентгенівські промені поширилися всередині об'єкта контролю;  $E_0^2$  – інтенсивність випромінювання до попадання на об'єкт контролю.

Основні закони геометрії для побудови тінювих зображень включають:

- правила подібності трикутників,
- теорему Піфагора,
- теореми синусів і косинусів,
- формули для визначення тригонометричних функцій кутів прямокутного трикутника.

Розглянемо особливості визначення тінювих зображень найпростіших предметів. Нехай цей об'єкт – циліндр. Розташування циліндра в скринінговій системі показано на рис. 2.

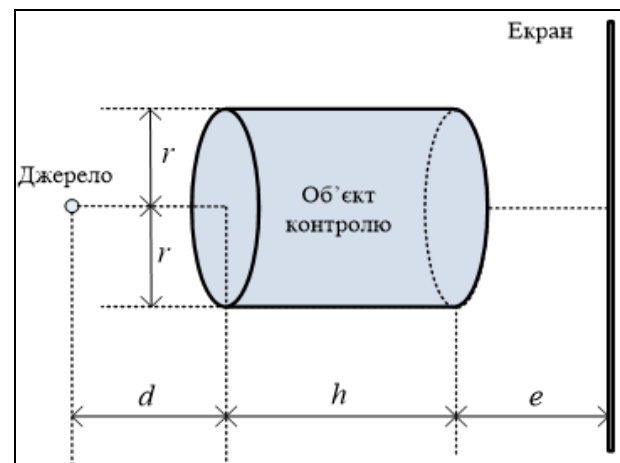


Рис. 2. Розташування циліндру в скринінговій системі

Вважаємо, що джерело випромінювання точкове. Циліндр має розміри радіус  $r$  та висоту  $h$ . Відстань між джерелом випромінювання та досліджуваным об'єктом дорівнює  $d$ . Відстань між об'єктом контролю та екраном приймача дорівнює  $e$ . Досліджуванний об'єкт має однорідну структуру, тому коефіцієнт  $\alpha = \text{const}$ . Пряма, що сполучає центр мас циліндра і джерело випромінювання, перпендикулярна до екрана, тобто ця пряма проходить через центральну вісь циліндра.

Щоб отримати загальне математичне рівняння для тінювого зображення, спочатку розглянемо формування тінювого зображення в одній площині, а потім використаємо метод сканування.

Проекція розташування циліндра на площину, перпендикулярну до осі ординат, зображена на рис. 3.

Вісь абсцис відповідає напрямку вниз на поверхні екрана. Початок системи координат розташований на поверхні екрана в точці  $O$ , до якої спрямо-

ваний перпендикуляр від джерела. Тіньове зображення буде описуватися парною функцією, тому розрахунок проводитиметься лише для додатних значень.

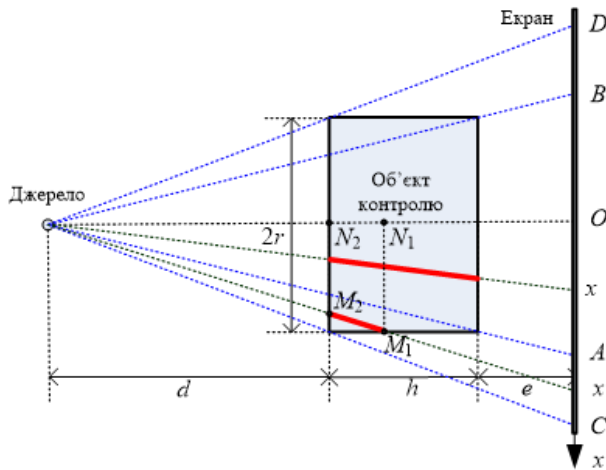


Рис. 3. Проекція розташування циліндра на площину, перпендикулярну до ординати

На першому етапі обчислень проведемо промені від джерела до вершин прямокутника (на рис. 3 вони позначені синіми пунктирними лініями). Очевидно, що  $OA = OB$ ,  $OC = OD$ . За правилом подібності прямокутних трикутників можна записати пропорції

$$\frac{OA}{r} = \frac{d+h+e}{d+h} \text{ та } \frac{OC}{r} = \frac{d+h+e}{d}.$$

Тому

$$OA = \frac{r(d+h+e)}{d+h} \text{ та } OC = \frac{r(d+h+e)}{d}. \quad (3)$$

На другому етапі розрахунків проведемо два промені від джерела до екрана. Один промінь потрапляє в точку на відрізку  $OA$ , а інший – у точку на відрізку  $AC$ . Необхідно визначити відстані  $\Delta$  всередині досліджуваного об'єкта (на рис. 3 вони позначені червоними відрізками).

Розглянемо перший промінь. Щоб визначити розглянутий відрізок, знайдемо гіпотенузу правого трикутника з вершинами в джерелі, точці  $O$  та точці  $h$  на відрізку  $OA$

$$g = \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}.$$

За правилом подібності прямокутних трикутників можемо записати пропорцію

$$\frac{\Delta}{g} = \frac{h}{d+h+e}.$$

Звідси

$$\Delta = \frac{h}{d+h+e} \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}. \quad (4)$$

Розглянемо другий промінь. Прямокутний трикутник з вершинами в джерелі, точці  $O$  та точці  $h$  на відрізку  $AC$  має гіпотенузу

$$g = \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}.$$

За правилом подібності прямокутних трикутників можемо записати пропорції

$$\frac{h_1}{g} = \frac{r}{x} \text{ та } \frac{h_2}{g} = \frac{d}{d+h+e},$$

де  $h_1$  – гіпотенуза прямокутного трикутника з вершинами в джерелі, точці  $M_1$  та точці  $N_1$ ,  $h_2$  – гіпотенуза прямокутного трикутника з вершинами в джерелі, точці  $M_2$  та точці  $N_2$ . Очевидно що

$$\Delta = h_1 - h_2 = \left( \frac{r}{x} - \frac{d}{d+h+e} \right) \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}. \quad (5)$$

З урахуванням рівнянь (3), (4) та (5), можемо визначити математичне рівняння тіні

$$\Delta(x) = \begin{cases} \frac{h}{d+h+e} \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}, & \text{якщо } |x| \leq \frac{r(d+h+e)}{d+h}, \\ \left( \frac{r}{|x|} - \frac{d}{d+h+e} \right) \sqrt{x^2 + (d+h+e)^2}, & \text{якщо } \frac{r(d+h+e)}{d+h} \leq |x| \leq \frac{r(d+h+e)}{d}, \\ 0, & \text{в інших випадках.} \end{cases} \quad (6)$$

Для отримання остаточної математичної моделі тіньового зображення на екрані приймача розглянемо метод сканування, особливості якого показано на рис. 4.

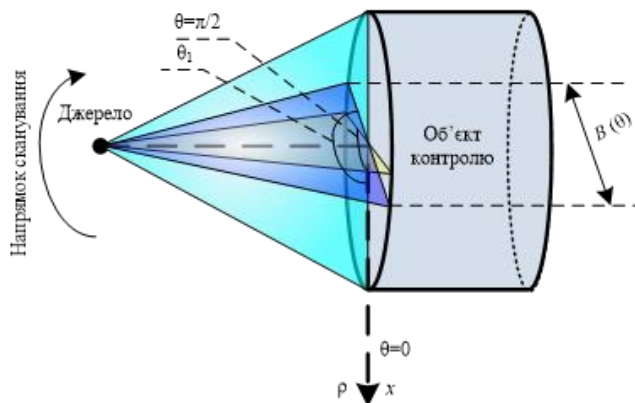


Рис. 4. Проекція розташування циліндра на площину, перпендикулярну до ординати

Процес сканування краще розглядати в циліндричній системі координат. Вісь абсцис збігається з віссю  $\rho$ . При цьому площа сканування змінюється в залежності від кута нахилу  $\theta$ .

Перерізом циліндра при різних кутах нахилу  $\theta$  є прямокутник зі стороною  $B(\theta)$ . Проекція розташування циліндра на площину для різних кутів нахилу  $\theta$  буде такою ж, як на рис. 3, але замість  $2r$  отримаємо  $B(\theta)$ . За визначенням функції косинус

$$B(\theta) = \frac{2r}{\cos \theta}. \quad (7)$$

Для зручності формування функцій зробимо зворотний перехід від циліндричної системи координат з аргументами  $\rho$  і  $\theta$  до декартової системи координат з аргументами  $x$  і  $y$ . Цю операцію можна здійснити за допомогою відомих формул

$$\theta(x, y) = \arctg \frac{y}{x}, \quad \rho(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Використовуючи рівняння (6), (7) та пояснений метод сканування з переходом до циліндричної системи координат і зворотним переходом, після математичного спрощення кінцеве рівняння для тіньового зображення циліндра можна представити наступним чином:

$$\Delta(x, y) = \begin{cases} \frac{h}{d+h+e} \sqrt{x^2 + y^2 + (d+h+e)^2}, & \text{якщо } \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{r(d+h+e)}{d+h}, \\ \left( \frac{r}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{d}{d+h+e} \right) \sqrt{x^2 + y^2 + (d+h+e)^2}, & \text{якщо } \frac{r(d+h+e)}{d+h} \leq \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{r(d+h+e)}{d}, \\ 0, & \text{у інших випадках.} \end{cases} \quad (8)$$

Рівняння (8) представляє зображення тіні в логарифмічному масштабі. Реальна величина тіньового зображення можна отримати за допомогою рівняння Бера-Ламберта (2), але у разі використання псевдокольорової шкали логарифмічна шкала дає більше можливостей для подальшого розпізнавання певних об'єктів. На рис. 5 показаний приклад тіньового зображення циліндра.

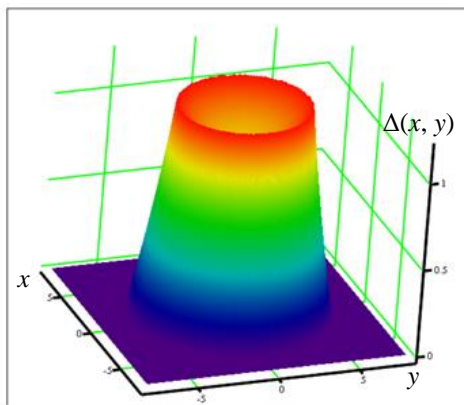


Рис. 5. Приклад тіньового зображення циліндра

За аналогічною методикою можуть бути отримані математичні моделі для тіньових зображень інших типів об'єктів контролю, зокрема паралелепіпеда, конуса, кулі, тора та інших геометричних фігур. Зазначені об'єкти є об'єктами простої форми. Їх комбінація та композиція можуть бути використані для отримання складних об'єктів, які можуть вважатися моделями заборонених та небезпечних об'єктів доглядового контролю.

Метод побудови тіньових зображень розроблений з метою синтезу нових технологій розпізнавання небезпечних предметів під час сканування багажу рентгенівськими інтроскопами.

У цій статті досліджено спектральний метод виявлення небезпечних предметів на прикладі пістолета. Блок-схема спектрального методу зображена на рис. 6.

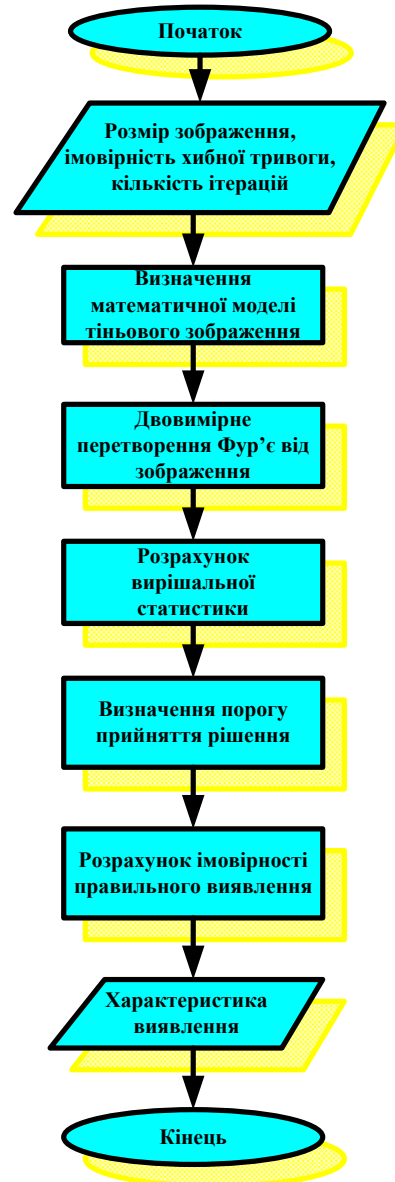


Рис. 6. Блок-схема спектрального методу виявлення пістолета

Початковою інформацією для аналізу методу розпізнавання є розмір зображення, кількість ітерацій і ймовірність хибної тривоги. Для спрощення розрахунків було обрано розмір зображення в пікселях. Кожен піксель містить інформацію про колір за допомогою 512 дискретних значень. Кількість ітерацій може бути довільною, але в цьому дослідженні було обрано 1000 ітерацій. Ймовірність  $\alpha$  хибної тривоги була встановлена на рівні 0,01.

Першим кроком було отримання тіньових зображень пістолета, модель якого складається з тіней трьох об'єктів: 1) паралелепіпеда (для зображення

рукоятки пістолета); 2) циліндра (для відображення ствола пістолета); 3) другого циліндра (для відображення дульного зрізу пістолета).

Оскільки матеріал пістолета не пропускає рентгенівське випромінювання, тінь від пістолета на зображенні відповідає максимальному рівню реакції. Тінь пістолета утворює зображення маски розміру  $70 \times 35$  пікселів. Тіньове зображення пістолета випадковим чином накладається на зображення розміром  $256 \times 256$  пікселів. Таким чином, було згенеровано випадкове розташування та орієнтацію пістолета на зображенні для кожної ітерації моделювання. Окрім того, для кожного пікселя зображення формується адитивний гаусівський шум.

Другим кроком є розрахунок просторових спектрів аналізованих зображень. Далі виконується розрахунок вирішальної статистики. Ця операція реалізується як згортка спектрів зображення маски, накладеного на таке зображення, яке має розмір

$256 \times 256$  пікселів без шуму та досліджуване зображення. Поріг прийняття рішення обирається з метою отримання заданої ймовірності хибної тривоги.

Останнім кроком піл час розрахунку є обчислення ймовірності правильного виявлення та побудова характеристики виявлення. Зазначену ймовірність було розраховано як відношення рішень щодо наявності пістолета до загальної кількості ітерацій для різних значень амплітуди сигналу та шуму. Припущення про різні значення амплітуди сигналу є ідеалізованим і може бути використане лише для математичної моделі, оскільки тінь пістолета завжди має максимальну амплітуду. Тому оцінюване значення ймовірності правильного виявлення було вибрано для співвідношення сигнал/шум, що дорівнює 1. Для цього моделювання ймовірність правильного виявлення дорівнює 0,99997 (для 100000 ітерацій).

Характеристика виявлення пістолета показана на рис. 7.

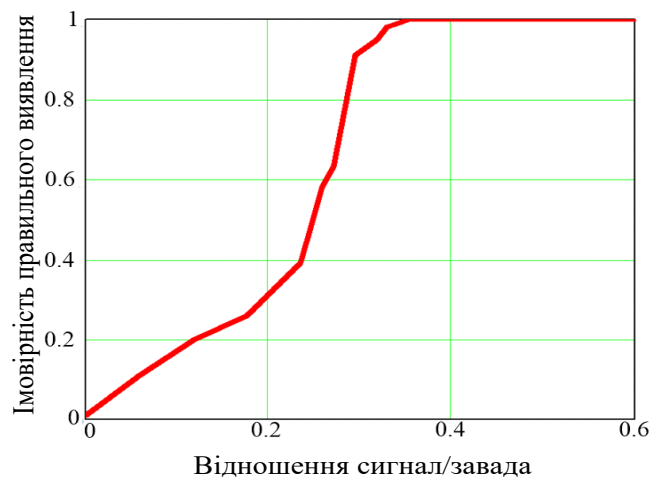


Рис. 7. Характеристика виявлення пістолету

Моделювання засвідчило такі переваги спектрального методу розпізнавання небезпечних і заборонених предметів:

1. Висока ефективність виявлення пістолета (ймовірність правильного виявлення дорівнює 0,99997, ймовірність хибної тривоги – 0,01).

2. Завдяки властивостям просторового спектру ефективність виявлення пістолета не залежить від положення, розташування та орієнтації пістолета на досліджуваному зображенні.

3. Висока швидкодія і низька вартість обчислювальних ресурсів.

### Висновки

У статті розглядаються принципи обробки тіньових зображень при скануванні багажу рентгенівською системою. Математичні рівняння тіньових зображень отримані на основі базових законів геометрії та рівняння Бера-Ламберта з урахуванням обрної методики сканування. Ця стаття зосереджена на прикладі отримання математичних моделей тіньового зображення для циліндра. Тіньові зображення простих об'єктів можуть бути використані для опису складних небезпечних і заборонених предметів. За-

пропонований спектральний метод розпізнавання на основі інформації щодо внутрішньої структури об'єктів контролю за допомогою тіньових зображень дає можливість з високою ймовірністю виявляти небезпечні об'єкти в реальному часі, підвищує швидкість прийняття рішення щодо наявності небезпечних предметів у багажі та може сприяти автоматизації процесів догляду пасажирів та багажу.

Майбутні дослідження пов'язані з наступними напрямками:

– збір бази даних тіньових зображень простих і складних об'єктів;

– збір бази даних тіньових зображень небезпечних та заборонених об'єктів авіаційної безпеки;

– аналіз двовимірних просторових спектрів масок небезпечних і заборонених об'єктів;

– синтез алгоритмів спектрального виявлення різноманітних небезпечних і заборонених об'єктів на основі критерію Неймана-Пірсона та байєсівського підходу;

– аналіз ефективності методики розпізнавання за використанням тіньових зображень (оцінка ймовірності правильного виявлення та ймовірності помилкової тривоги).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Doc 9859. Safety Management Manual. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2018.
2. M. Chen, Y. Zhang and Y. Chen. Review on Civil Aviation Safety Investment Research. In 2016 11th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICRMS.2016.8050113.
3. Annex 17 to the Convention on Int. Civil Aviation, Security, Montreal: International Civil Aviation Organization, 2006.
4. L. Ji and Y. Mou. Research on the Feasibility of Application of Millimeter-wave Security Screening Equipment in Civil Aviation. In 2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT), 2021, pp. 71–75. Doi: 10.1109/ICCASIT53235.2021.9633747.
5. Семенов О.О. Технічні засоби служби авіаційної безпеки. Київ: НАУ, 2013, 264 с.
6. D. Anderson. Optimising Multi-layered Security Screening. *Journal of Transportation Security*. Vol. 14, 2021, pp. 249–273. Doi: 10.1007/s12198-021-00237-3.
7. P. Gupta, Z. Sinno, J. L. Glover, N. G. Paulter and A. C. Bovik. Predicting Detection Performance on Security X-Ray Images as a Function of Image Quality. *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 28, No. 7, 2019, pp. 3328–3342. Doi: 10.1109/TIP.2019.2896488.
8. S. Almazroui, W. Wang and G. Zhang. Imaging Technologies in Aviation Security. *European Journal of Applied Sciences*, Vol. 3, No. 4, 2015, pp. 12–27. Doi: 10.14738/aivp.34.1433.
9. J. Skorupski and P. Uchroński. A Human Being as a Part of the Security Control System at the Airport. *Procedia Engineering*, Vol. 134, 2016, pp. 291–300. Doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.010.
10. M. Zaliskyi. Reliability parameters estimation in case of aviation radio electronic devices technical state deterioration. *Electronics and Control Systems*, 2015, № 3 pp. 18–22.
11. R. Gesick, C. Saritac and C.-C. Hung. Automatic Image Analysis Process for the Detection of Concealed Weapons. In Proceedings of the 5th Annual Workshop on Cyber Security and Information Intelligence Research Cyber Security and Information Intelligence Challenges and Strategies, 2009, pp. 1–12. Doi: 10.1145/1558607.1558630.
12. V. Riffo and D. Mery. Automated Detection of Threat Objects Using Adapted Implicit Shape Model. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems*, Vol. 46, No. 4, 2016, pp. 472–482. Doi: 10.1109/TSMC.2015.2439233.
13. S. Akçay, M. E. Kundegorski, M. Devereux and T. P. Breckon. Transfer Learning Using Convolutional Neural Networks for Object Classification within X-ray Baggage Security Imagery. In 2016 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2016, pp. 1057–1061. Doi: 10.1109/ICIP.2016.7532519.
14. B. Gu, R. Ge, Y. Chen, L. Luo and G. Coatrieux. Automatic and Robust Object Detection in X-Ray Baggage Inspection Using Deep Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 68, No. 10, 2021, pp. 10248–10257. Doi: 10.1109/TIE.2020.3026285.
15. Y. F. A. Gaus, N. Bhowmik, S. Akçay, P. M. Guillén-Garcia, J. W. Barker and T. P. Breckon. Evaluation of a Dual Convolutional Neural Network Architecture for Object-wise Anomaly Detection in Cluttered X-ray Security Imagery. In 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 2019, pp. 1–8. Doi: 10.1109/IJCNN.2019.8851829.
16. J. Zhang, X. Song, J. Feng and J. Fei. X-Ray Image Recognition Based on Improved Mask R-CNN Algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2021, pp. 1–14, doi: 10.1155/2021/6544325.
17. A. K. Shukla. *Medical Imaging Methods: Theory and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2022, 200 p.
18. R. Alberts. *Modeling and Control of Image Processing for Interventional X-Ray*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2010, 202 p.

Received (Надійшла) 25.12.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.02.2023

**Method for building shadow images  
of the inspected objects using X-ray system of aviation security**

M. Zaliskyi, O. Shcherbyna, L. Tereshchenko, A. Osipchuk, O. Zharova, P. Stanko

**Abstract.** The article is devoted to the development of a method for constructing shadow images of control objects of X-ray introsopes and the analysis of its application for the recognition of dangerous and prohibited items on baggage images. It is known that aviation security is significantly determined by measures to ensure aviation security. For this, radio-electronic systems and computerized complexes of screening equipment are used. This equipment includes X-ray introsopes, metal detectors and metal detectors, body scanners, gas analyzers, etc. Screening equipment is used to detect dangerous and prohibited items from passengers and their luggage. One of the main problems with this is the high probability of false alarms when dangerous objects are detected by X-ray systems. In some cases, this probability can be as high as 0.3, which negatively affects the passenger capacity of airports. In order to eliminate this shortcoming, this article provides a detailed description of new technologies for detecting dangerous objects based on the use of projection shadow images of control objects. The proposed method for constructing shadow images is based on the use of the triangle similarity rule, the Pythagorean theorem, the theorem of sines and cosines, and formulas for determining the trigonometric functions of the right triangle angles. The explanation of the method for obtaining shadow images is made on the example of a control object in the cylinder form. In this case, the standard method for determining the mathematical model of the shadow in one scanning plane is first presented. Next, the developed scanning method is used, which provides for direct and inverse transition to cylindrical and Cartesian coordinate systems. The resulting mathematical models of shadow images of a simple form are used to build models of complex shape, which can be considered as models of prohibited and dangerous objects of control. The detection algorithm involves finding the spatial Fourier transform of the shadow image, followed by convolution with the spectrum of the mask of the desired forbidden or dangerous object. The article analyzes the results of modeling a detector for recognizing a handgun on luggage images. To analyze the detection efficiency, the corresponding detection characteristic is calculated. The analysis showed the effectiveness of the spectral detector in terms of statistical characteristics. In this case, when recognizing the handgun, the probability of correct detection is 0.99997, and the probability of a false alarm is 0.01. The results of the study can be used to automate the processes of screening passengers and baggage.

**Keywords:** aviation security, X-ray system, shadow images, image processing, spectral detector, Neyman-Pearson criterion.