

# RADAR AND RADIONAVIGATION РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОНАВІГАЦІЯ

УДК 004.89: 621.396

DOI:10.30837/rt.2024.1.216.12

*В.В. ЖИРНОВ, канд. техн. наук, С.В. СОЛОНСЬКА, канд. техн. наук*

## МЕТОДИ ЛОГІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ВІДМІТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ СЕМАНТИЧНИХ ОЗНАК

### Вступ

Наводяться результати обґрунтування та розробки методів логічної обробки зображень відміток радіолокаційних об'єктів на основі семантичних ознак, дослідження можливостей створення алгоритмів та програм автоматичного виявлення радіолокаційних позначок повітряних об'єктів та їх розпізнавання в оглядових РЛС з обробкою реальних записів сигналів. Актуальність цих робіт – створення універсальних алгоритмів автоматичної обробки інформації для забезпечення ефективного виявлення та розпізнавання корисних сигналів на основі семантичних ознак. Складність класичних радіолокаційних систем [1, 2] полягає в недостатній автоматизації процесів обробки даних, у тому числі в системах виявлення та радіолокаційного розпізнавання відміток повітряних об'єктів щодо аналізу їх зображень. У нашому випадку необхідно наблизити процедуру обробки зображень об'єктів радіолокації до логіки експерта, для якої характерно послідовне залучення до аналізу ситуації розрізнявальних ознак між відображеннями від різних об'єктів. Завдання виявлення та розпізнавання сигнальних образів об'єктів радіолокації в даному випадку трансформується в завдання ознакової класифікації (розпізнавання).

В сучасній техніці обробки сигналів та інформації недостатньо ефективно використовуються можливості експерта – оператора РЛС, який на основі даних про радіолокаційну обстановку: координати, форма, яскравість корисних і завадових відміток та багатооглядова передісторія, може ефективно отримувати та передавати радіолокаційну інформацію (РЛІ) споживачеві. Основною перевагою інтелектуальних моделей є аналіз просторово-часової картини, що відображається на екрані індикатора, виявлення відміток, фільтрування геометричних образів трас літальних апаратів і завадового фону [3 – 4]. Це дозволяє регулювати неявні пороги візуального виявлення, відкладати та змінювати недостовірні рішення та оцінки, приймати рішення щодо накопиченого траєкторного сигналу ЛА, надавати ознаки. Основою є розробка алгоритмів формування образів радіолокаційних сигналів для інтелектуальної системи виявлення відміток рухомих об'єктів та автоматизації операцій обробки інформації, що підвищують ефективність виявлення слабких сигналів завдяки накопиченню сигнальної (енергетичної) та логічної інформації. При цьому логічна інформація накопичується з аналізу динамічної карти інтенсивностей радіолокаційних сигналів з відстеженням змін, що відбуваються в ній, протягом багатьох зондувань РЛС.

Методи обробки та розпізнавання радіолокаційних сигнальних образів [5] застосовуються в багатьох областях – у військовій справі, в авіації, у наземному та надводному транспорті. Базовим поняттям цих методів є подоба об'єктів і, навіть, кількісна міра подоби.

Розпізнавання зображень є окремим випадком розпізнавання образів. Це перетворення інформації, що міститься у зображеннях, з метою виділення найважливіших з погляду того чи іншого конкретного завдання даних. Існують методи логічного розпізнавання [5], у яких обробка інформації виконується згідно з чітко визначеним алгоритмом з метою виділення цінної інформації, та методи інтуїтивного розпізнавання, коли відбувається генерація цінної інформації.

Основна складність в існуючих системах полягає у недостатній автоматизації процесів обробки даних, в тому числі в системах виявлення та розпізнавання сигналів об'єктів та процесів за розрізняючими ознаками сигналів та сигнальних образів (просторового та спектрального зображень). Вирішення цієї проблеми стає важливим у випадках, коли об'єкти та відносини предметної області пов'язані складними логічними залежностями, що, у свою чергу, вимагає побудови математичних моделей, завдяки яким можливий ефективний логічний висновок, що відповідає вимогам користувача.

Семантична складова зображення радіолокаційного об'єкта – це семантичний елемент, що містить смислову складову, і може виступати як одна з його характеристик. В інформаційних радіолокаційних системах, що оперують семантичними кодами, семантична складова може виражатися окремим символом – семантичним множителем або ознакою.

**Постановка завдань дослідження.** Існує суперечність у практиці: низька автоматизація процесів обробки даних, зокрема, у системах виявлення та розпізнавання сигналів об'єктів та процесів за розрізняючими ознаками сигналів та сигнальних образів. У той самий час немає ефективних технологій для вирішення завдань, коли об'єкт та його відображення (відносини, зображення) в сигнальній області пов'язані складними логічними залежностями. Застосування алгебри предикатів під час формування та опису сигнального образу дає можливість визначати семантичні складові його поведінки та на їх основі розробляти системи автоматичного виявлення та розпізнавання радіолокаційних об'єктів в реальному часі.

### **Метод логічної обробки зображень відміток радіолокаційних об'єктів**

Аналіз методів виявлення та розпізнавання показав, що для систем автоматичної обробки радіолокаційної інформації доцільно використовувати методи логічного виявлення та розпізнавання [1, 2, 5], в яких обробка інформації виконується за визначеним алгоритмом з метою виділення цінної інформації, та методи інтуїтивного розпізнавання, коли відбувається генерація цінної інформації. Основна складність у методах логічного розпізнавання образів полягає у низькій автоматизації процесів обробки даних, у тому числі в системах виявлення та розпізнавання сигналів об'єктів та процесів за розрізняючими ознаками сигналів та сигнальних образів (просторового та спектрального зображень).

Результати аналізу процесу формування та аналізу сигнальних образів для інтелектуальних систем виявлення та розпізнавання об'єктів показали доцільність класифікації всієї сукупності зображень відміток [6 – 8]. Такий підхід дозволяє створювати алгоритми автоматичної обробки інформації та підвищувати ефективність виявлення та розпізнавання корисних сигналів за рахунок накопичення сигнальної (енергетичної) та логічної інформації в аналізованому елементі дозволу та в його осередку. Для цього пропонується метод представлення інтелектуального образу радіолокаційних відміток, який дозволяє формалізувати та спостерігати динаміку формування семантичної ознаки протягом кількох зондувань РЛС. Далі було згенеровано узагальнену семантичну ознаку, яка характеризує поведінку сигнальної відмітки протягом декількох зондувань РЛС, як певний образ, подібний до образу, яким користується оператор при ототожненні сигнальних відміток.

Розроблено метод прийняття рішення про виявлення та розпізнавання радіолокаційних об'єктів на основі аналізу матриці простору ознак (рис. 2). Перевага даного методу пов'язана з використанням додаткової інформації, отриманої під час створення та аналізу інтелектуального зображення радіолокаційної відмітки (рис. 3). Запропонований підхід включає багаторівневі процедури для формалізації та автоматичної генерації символічних зображень точкового об'єкту, такого як літак, вертоліт, БПЛА. Модель включає систему предикатних рівнянь, в результаті розв'язання цих рівнянь визначається вид і значення предикатних ознак, а також перелік процедурних і семантичних операцій обробки.

Суть метода логічної обробки радіолокаційних образів при автоматичному виявленні й розпізнаванні об'єктів на основі семантичних ознак – це формування вектору прийняття рішення про виявлення та розпізнавання зображень радіолокаційних відміток шляхом логічної обробки простору векторів семантичних ознак  $W(I_g, I_s, I_f)$ , який задано на множині

семантичних ознак зображень  $\{I_1, I_2, \dots, I_k\}$  з урахуванням геометричної  $\{I_{g1}, I_{g2}, \dots, I_{gk}\}$ , смислової  $\{I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sk}\}$  складових зображень та семантичної ознаки їх флуктуацій  $\{I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fk}\}$ .

На рис. 1 наведено алгоритмічну схему автоматичного прийняття рішення про виявлення та розпізнавання радіолокаційних зображень літальних апаратів. Ухвалення рішень у вигляді вектор  $O_k = W(I_s, I_g, I_f, I_e)$  про виявлення та ідентифікацію  $k$  літальних апаратів здійснюється шляхом обробки предикатної операції  $W(I_s, I_g, I_f, I_e)$ , яка задана на множині предикатних ознак відміток  $\{I_s, I_g, I_f, I_e\}$  на основі смислової  $\{I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sk}\}$ , геометричної  $\{I_{g1}, I_{g2}, \dots, I_{gk}\}$ , енергетичної  $\{I_{e1}, I_{e2}, \dots, I_{ek}\}$  складових символічних зображень та ознаки їх флуктуацій  $\{I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fk}\}$ .

З аналізу семантичних ознак смислової  $I_s$ , геометричної  $I_g$ , енергетичної  $I_e$  та ознаки флуктуації  $I_f$  інтелектуальної моделі сигнальних відміток, здійснюється процедура виявлення та розпізнавання радіолокаційних об'єктів, у тому числі точкових рухомих і малорухомих літальних апаратів: літак, вертоліт, БПЛА.

#### Метод логічної обробки зображень радіолокаційних об'єктів на основі семантичних ознак

Проведемо обґрунтування запропонованого методу обробки. Позначимо через  $X$  множину об'єктів радіолокації. Семантична ознака – це деяка характеристика об'єкта, відображення  $I: X \rightarrow D_I$ , де  $D_I$  – множина допустимих значень ознаки. Якщо задано ознаки  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , тоді вектор  $x = (I_1(x), I_2(x), \dots, I_n(x))$  назвемо ознаковим описом об'єкту.

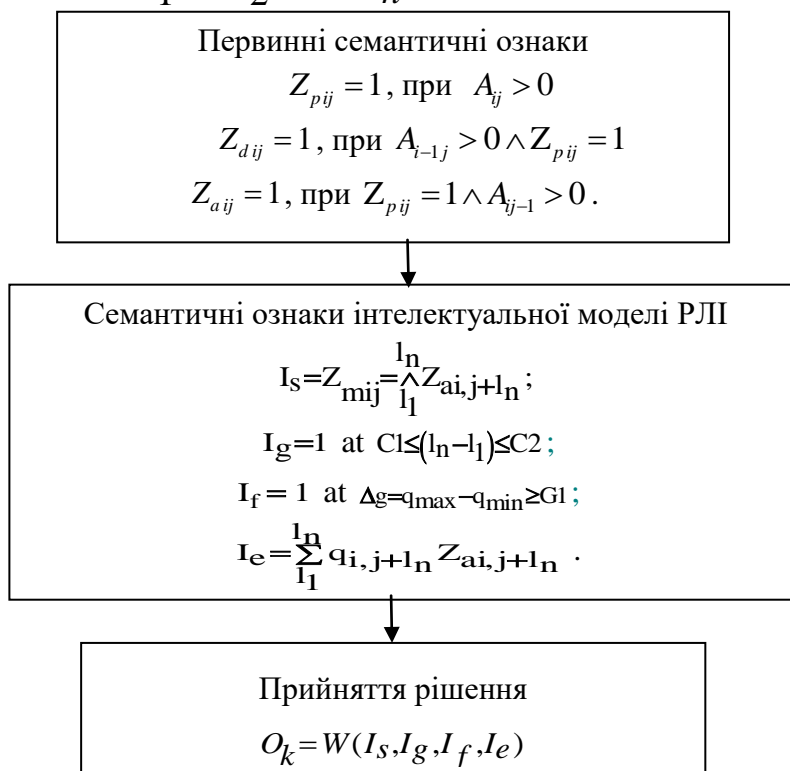


Рис. 1. Схема прийняття рішення

На основі системи первинних семантичних ознак [6]: предикат  $Z_{pij}$  наявності сигналу в  $a_{ij}$  інформаційному осередку ( $i, j$  – номери елементів зони огляду РЛС); предикати сусіднього осередку  $Z_{dij}$  та  $Z_{aij}$  переходу сигналу з поточного осередку  $a_{ij}$  до суміжного осередку за дальністю або азимутом, сформовано складники інтелектуальної моделі зображень сигналів для точкових рухомих та малорухомих літальних апаратів:

- первинні семантичні ознаки  $Z_{pij}, Z_{dij}, Z_{aij}$ , що дозволяють створити опис об'єкту радіолокації на підставі семантичних зв'язків і відносин

$$x_1 = \{I_1(Z_{pij}, Z_{dij}, Z_{aij}), I_2(Z_{pij}, Z_{dij}, Z_{aij}), \dots, I_n(Z_{pij}, Z_{dij}, Z_{aij})\}$$

між подіями в інформаційних осередках під час формування віртуального просторово – семантичного зображення радіолокаційних відміток;

- семантичні ознаки радіолокаційних зображень  $X = (I_1(x_1), \dots, I_n(x_1), \dots, I_1(x_k), \dots, I_n(x_k))$  для  $k$  об'єктів на основі аналізу первинних семантичних ознак;

- матриця семантичних ознак об'єктів радіолокації, розміру  $k \times n$ ,  $\{I_s(X), I_g(X), I_e(X), I_f(X)\}$ , що створена з урахуванням смислової  $\{I_{s1}(x_1), I_{s2}(x_2), \dots, I_{sk}(x_k)\}$ , геометричної  $\{I_{g1}(x_1), I_{g2}(x_2), \dots, I_{gk}(x_k)\}$ , енергетичної  $\{I_{e1}(x_1), I_{e2}(x_2), \dots, I_{ek}(x_k)\}$  складових інтелектуальних зображень і ознаки флуктуації  $\{I_{f1}(x_1), I_{f2}(x_2), \dots, I_{fk}(x_k)\}$ . Стовпці цієї матриці відповідають ознакам, а кожен рядок є ознаковим описанням одного об'єкту радіолокації. На рис. 2 наведено зразок матриці.

$I_{s1}(x_1)$	$I_{g1}(x_1)$	$I_{e1}(x_1)$	$I_{f1}(x_1)$
$I_{s2}(x_2)$	$I_{g2}(x_2)$	$I_{e2}(x_2)$	$I_{f2}(x_2)$
...	...	...	...
$I_{sk}(x_k)$	$I_{gk}(x_k)$	$I_{ek}(x_k)$	$I_{fk}(x_k)$

Рис. 2. Матриця семантичних ознак об'єктів радіолокації

### Метод логічної обробки зображень для автоматичного виявлення й розпізнавання радіолокаційних об'єктів

Проведено дослідження для розроблення методу логічної обробки зображень відміток для оглядових РЛС. У ході дослідження:

1. Сформовано символні зображення огинаючої пачки імпульсів РЛ відміток літальних апаратів. Це –  $n$  мірний вектор загальної матриці зони огляду РЛС. При цьому у кожній пачці сигналу може змінюватися частота Доплера і величина сигналу для заданої дальності. За допомогою таких операцій змодельовано різні радіолокаційні ситуації: політ одного літального апарату по всіх елементах дальності на тлі завади, політ літаків із різними швидкостями, що знаходяться на різній дальності. Відповідно до моделей реальних сигналів обрано три типи характерних радіолокаційних зображень сигналів та їх символні зображення, які наведено на рис. 3, 4. З цих типів реальних зображень обрано еталонні типи пачок радіолокаційних сигналів цілей і завод та їх символні зображення  $S_j$ . Кожному типу зображення відповідає певна комбінація геометричних та семантичних (предикатних) ознак, що визначаються із систем предикатних рівнянь.

2. Розроблено метод логічної обробки зображень радіолокаційних об'єктів на основі семантичних ознак. Для ідентифікації радіолокаційних зображень сформовано простір ознак

для множини радіолокаційних об'єктів з урахуванням допустимих значень признака  $D_l$  у вигляді матриці ознакових описів зображень об'єктів радіолокації. Матрицю створено на множині ознак  $\{D_s(X), D_g(X), D_e(X), D_f(X)\}$  на основі смислової  $\{D_{s1}(x_1), D_{s2}(x_2), \dots, D_{sk}(x_k)\}$ , геометричної  $\{D_{g1}(x_1), D_{g2}(x_2), \dots, D_{gk}(x_k)\}$ , енергетичної  $\{D_{e1}(x_1), D_{e2}(x_2), \dots, D_{ek}(x_k)\}$  складових інтелектуальної моделі зображень і семантичної ознаки флуктуації  $\{D_{f1}(x_1), D_{f2}(x_2), \dots, D_{fk}(x_k)\}$

Розроблено алгоритм ідентифікації типів  $S_j$  інтелектуальних зображень, що описується системою предикатних рівнянь, складеної виходячи з того, що кожному символічному типу  $S_j$  зображень (рис. 4) відповідає певна комбінація геометричних та семантичних (предикатних) ознак, що визначаються системами предикатних рівнянь. Наприклад, для типів зображень  $S_1$  точкових рухомих і малорухомих літальних апаратів: літак, вертоліт, БПЛА використовується система предикатних рівнянь, у результаті яких визначаються семантичні ознаки зображення відмітки. На рис. 3, 4 показано типи характерних зображень радіолокаційних сигналів та їх інтелектуальна модель.

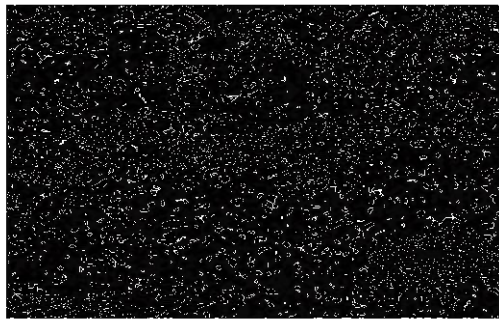


Рис. 3. Реальні РЛ зображення

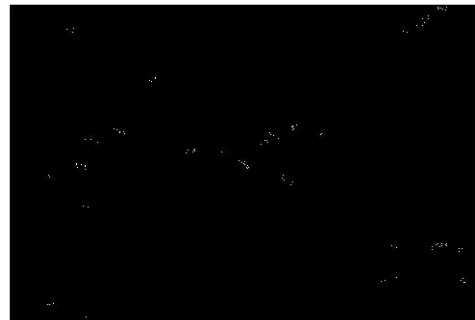


Рис. 4. Інтелектуальна модель РЛ зображення

На підставі зазначених вище закономірностей було сформовано простір ознак для обраних типів об'єктів радіолокації з урахуванням допустимих значень ознаки, що дозволяють відрізнити зображення відміток об'єктів радіолокації.

Кожна складова інтелектуальної моделі зображень може мати свій підпростір ознак залежно від типу або класу об'єкта радіолокації. Наприклад, якщо об'єкт точковий і рухається, то формується модель у вигляді протяжної по азимуту відмітки з розривами за рахунок доплерівських флуктуацій амплітуди. Якщо ж об'єкт протяжний, наприклад хмари, дощові хмари, зграї птахів, локальні повітряні неоднорідності ангел-луна, то з прийнятих сигналів формується модель цього об'єкту як сукупність зображень окремих блискучих точок. Тоді отримаємо матрицю розміру  $k \times n$  ( $k$  рядків,  $n$  стовпців). Стовпці цієї матриці відповідають ознакам зображень відміток, а кожен рядок є ознаковим описанням зображення відмітки об'єкта радіолокації. Тут  $l$  – розмір підпростір ознак залежно від типу або класу об'єкта радіолокації і може мати значення  $1 \dots l$ . На рис. 5 наведено зразок матриці.

$D_{s1}^l(x_1)$	$D_{g1}^l(x_1)$	$D_{e1}^l(x_1)$	$D_{f1}^l(x_1)$
$D_{s2}^l(x_2)$	$D_{g2}^l(x_2)$	$D_{e2}^l(x_2)$	$D_{f2}^l(x_2)$
...	...	...	...
$D_{sk}^l(x_k)$	$D_{gk}^l(x_k)$	$D_{ek}^l(x_k)$	$D_{fk}^l(x_k)$

Рис. 5. Матриця ознак інтелектуальної моделі зображень об'єктів радіолокації

## Висновки

Результати аналізу процесу формування та аналізу сигнальних образів радіолокаційної інформації для інтелектуальних систем виявлення та розпізнавання об'єктів показали доцільність класифікації всієї сукупності зображень. Для цього пропонується інтелектуальна модель радіолокаційних відміток, яка дозволяє формалізувати та спостерігати динаміку формування семантичної ознаки протягом кількох зондувань РЛС. Надалі, аналізуючи цю картину, було сформовано узагальнену семантичну ознаку, яка характеризує поведінку сигнальної відмітки протягом ряду зондувань РЛС, як певний образ, подібний до образу, яким користується оператор при ототоженні сигнальних відміток. Цей образ, як правило, враховує розмір, форму, характер зміни розміру та форми сигнальної відмітки. Розроблено метод прийняття рішення про виявлення та розпізнавання радіолокаційних об'єктів на основі аналізу матриці простору ознак. Пропонована інтелектуальна модель включає багаторівневі процедури для формалізації та автоматичного конструювання символічних зображень точкового об'єкта, що рухається, такого як літак, вертоліт, БПЛА. Модель включає систему предикатних рівнянь, в результаті розв'язання цих рівнянь визначається вид і значення предикатних ознак інтелектуальної моделі, а також перелік процедурних і семантичних операцій обробки.

### Список літератури:

1. Li Jian Radar Signal Processing and Its Applications / Jian Li, R. Hummel, P. Stoica, E. G. Zelnio. Springer, 2013. 279 p.
2. Skolnik M. I. (eds) (2021) Radar Handbook, McGraw-Hill, New York.
3. Russel S. Artificial intelligence. A modern approach, Second Edition / S. Russel, P. Norvig. Williams, 2006. 1410 p.
4. Бондаренко М. Ф. Теория интеллекта : учебник / М. Ф. Бондаренко, Ю. П. Шабанов-Кушнарченко. Харьков : СМІТ, 2007. 576 с.
5. Журавлев Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. 2005. Вып. 33. С. 5–68.
6. Volodymyr Zhyrnov, Svitlana Solonska "Symbolic model of radar images when detecting aircraft"// Telecommunications and Radio Engineering. 2022. Vol. 81, Is. 2. P. 25–35.
7. Жирнов В.В., Солонская С.В. Предикатная модель процессных знаний при обнаружении и распознавании пачечной структуры сигналов от летательных аппаратов в обзорных РЛС // Радиотехника. 2020. Вып. 201. С 137–144.
8. Jianping Ou, Jun Zhang, and Ronghui Zhan. Processing Technology Based on Radar Signal Design and Classification // International Journal of Aerospace Engineering. Vol. 2020, pp. 1–19. Article ID 4673763. <https://doi.org/10.1155/2020/4673763>.
9. Солонская С.В., Жирнов В.В. Предикатная модель процессных знаний при обнаружении и распознавании протяженных объектов типа облака, тучи, «ангел-эхо» в обзорных РЛС // Радиотехника. 2020. Вып. 202. С 164–172.
10. Zhirnov V.V., Solonskaya S.V. Intelligent system for detection of low-visible air objects in surveillance radars // Telecommunications and Radio Engineering. 2020. Vol. 79, Is. 17. P. 1513–1519. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i17.20.
11. Advanced Methods and Deep Learning in Computer Vision. 1st Edition / Editors: E. R. Davies, Matthew Turk. Academic Press. 2021. Page Count: 586. ISBN: 9780128221099.

*Надійшла до редколегії 21.01.2024*

### Відомості про авторів:

**Жирнов Володимир Віталійович** – канд. техн. наук, Харківський національний університет радіоелектроніки, п.н.с. НДЦ інтегрованих радіоелектронних систем і технологій, Україна; e-mail: [nauka123@ukr.net](mailto:nauka123@ukr.net); ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2397-3126>

**Солонська Світлана Володимирівна** – канд. техн. наук, НТУ "Харківський політехнічний інститут", Україна; e-mail: [solonskaya@ukr.net](mailto:solonskaya@ukr.net), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8841-7825>