

RADAR AND RADIONAVIGATION РАДІОЛОКАЦІЯ І РАДІОНАВІГАЦІЯ

УДК 004.89: 621.396

DOI:10.30837/rt.2023.1.212.14

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

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ЗОБРАЖЕНЬ ВІДМІТОК РАДІОЛОКАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ОГЛЯДОВИХ РЛС

Вступ

Наводяться результати розроблення інтелектуальної моделі зображень відміток радіолокаційних об'єктів для оглядових РЛС. Актуальність цих робіт полягає у створенні алгоритмів автоматичної обробки зображень радіолокаційних об'єктів для забезпечення ефективного автоматичного виявлення слабких корисних сигналів за рахунок накопичення сигнальної та логічної інформації в аналізованій комірці та в її околиці в складних заводових умовах. Удосконалення засобів забезпечення безпеки руху повітряного транспорту й автоматизація процесів управління його рухом вимагають ефективних процедур обробки сигнальної інформації. Актуальними є також питання більш повного використання та якісного підвищення інформаційних можливостей систем контролю, особливо в складних заводових умовах.

У відомих радіолокаційних інформаційних системах [1, 2] аналізуються моделі формування та динаміка змін зображень відміток об'єктів радіолокації, які формуються сукупністю відбитих від повітряних об'єктів радіолокаційних луна-сигналів. Ці зображення мають інформацію про повітряний об'єкт. Наприклад, якщо об'єкт точковий і рухомий, тоді формується зображення відмітки з пачки прийнятих елементарних відбитих сигналів у вигляді протяжної азимуту позначки, що має доплерівське зміщення несучої частоти РЛС. Відомі також операції в інтелектуальних інформаційних системах (ІС), де використовуються алгоритми аналізу зображень відміток, в основі яких лежить модель дій людини-оператора та які пов'язані з можливістю паралельного сприйняття інформації з подальшим прийняттям рішення щодо аналізу відмінюючих ознак [2 – 4]. Важливу роль у розробці математичного забезпечення ІС відіграють реляційні й логічні засоби представлення сигнальної інформації [4].

Існуючі підходи до моделей зображень відміток радіолокаційних об'єктів для оглядових РЛС не дозволяють створення на їх основі ефективних інформаційних систем для автоматичної їх обробки з метою виявлення та розпізнавання радіолокаційних об'єктів [1 – 4]. Перспективним вважається створення інтелектуальної моделі зображень відміток радіолокаційних об'єктів для оглядових РЛС, методів логічної обробки інтелектуальних зображень відміток і методу прийняття рішень, заснованого на локальному ознаковому описі [5 – 7]. В сучасних технологіях обробки сигналів та інформації недостатньо використовуються ті логічні операції, які подібні до семантики людини-експерта. Подібні операції широко використовують в технологіях інтелектуального аналізу процесів, таких, що, використовуючи дані про сигнальну обстановку, тобто, координати, форма, яскравість і передісторія, можуть отримувати корисну інформацію і передавати споживачеві.

Математичний опис інтелектуальної моделі зображень відміток радіолокаційних об'єктів для оглядових РЛС

Процес виявлення та розпізнавання повітряних об'єктів, що підлягає автоматизації, представлений як об'єднання двох основних завдань: розробка методики автоматичного конструювання інтелектуальних зображень радіолокаційних відміток та автоматичного конструювання текстів прийняття рішень про повітряні об'єкти, на основі аналізу смислових складових цих зображень. Алгоритм формування та логічної обробки інтелектуального зображення представлений у вигляді «вертикальної» структури у предикативній формі. Прискорення обчислень досягається тим, що групування доданків з однаковими множниками

у пірамідальному алгоритмі значно скорочує кількість операцій за рахунок виключення повторних процедур обчислень та операцій порівняння. При такому просторово-семантичному аналізі однакової обстановки радіолокації обсяг обробки зменшується в середньому у 2,6 рази зі збереженням необхідної достовірності. Радіолокаційна система шляхом огляду простору формує масив даних від кожної інформаційної комірки зони огляду, розміри якої визначаються роздільною здатністю або імпульсним об'ємом РЛС. З отриманих сигналів повітряних об'єктах формується карта чи матриця даних. Потім у результаті накопичення формується новий геометричний образ як віртуального зображення, тобто формується нова інтелектуальна модель зображення сигнальних позначок для точкових рухомих і малорухливих літальних апаратів типу літак, вертоліт, БПЛА (рис. 1).

Таким чином, база даних перетворюється на базу знань, в результаті аналізу якої визначаються предикатні ознаки, що містять інформацію про геометричний і смисловий образ символічних позначок. Зображення повітряних об'єктів на екрані індикатора РЛС формується як символи-образи. Формований масив даних є матрицею амплітуд $\|A\|$ розміром $M \times N$. Кожен елемент матриці i, j пов'язаний з відповідним інформаційним осередком зони огляду РЛС відповідно. Формування символічного масиву амплітуд $\|A\|$ здійснюється запам'ятовуванням величини амплітуди q_{ij} сигналу тривалість T огляду РЛС.

Ознаковий опис зображень радіолокаційних об'єктів

Процедури формалізації та аналізу геометричного та семантичного образу інтелектуальної моделі зображень відміток радіолокаційних об'єктів, що спостерігаються, здійснюються на основі алгебри предикатів [9 – 11]. При цьому визначається простір семантичних ознак, логічних зв'язків та залежностей на основі аналізу реальних процесів локації.

Ознакове виявлення та розпізнавання отриманих радіолокаційних зображень проводиться на логічному рівні обробки за допомогою алгебри кінцевих предикатів (АКП). АКП характеризується алфавітом подій A , що складається з k символів $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ і алфавітом змінних B , що складається з n символів x_1, \dots, x_n , за допомогою яких може бути записаний будь-який n -місцевий k -й предикат, заданий над алфавітом подій A . У даній роботі для ознакового опису радіолокаційних зображень позначок повітряних об'єктів обрано n -місцевий двійковий предикат $f(x_1, \dots, x_n)$. Інакше кажучи, символічна модель РЛ позначки точкового об'єкта – це пачка з n символів-предикатів x_1, \dots, x_n подій 0 чи 1 перевищення порога.

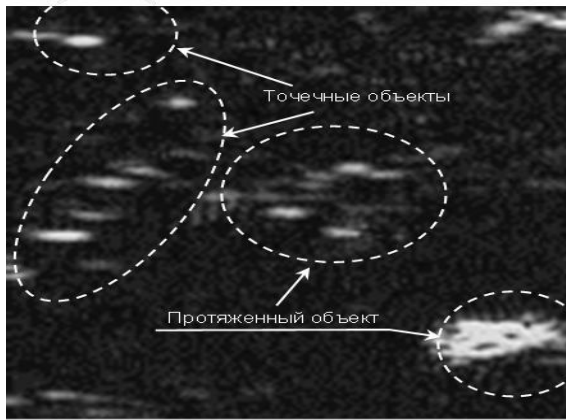
У ході досліджень використовувалися експериментальні дані (рис. 1), отримані під час запису відбитих сигналів оглядової РЛС сантиметрового діапазону (тривалість імпульсу 1 мкс, частота зондування 365 Гц). На рисунку наведено зображення розподілу амплітуд радіолокаційних позначок точкових та протяжних об'єктів у матриці розміром 129×129 реальних записів РЛС сигналів.

У розроблену інтелектуальну модель входять процедури формалізації та аналізу геометричного сигнального образу відміток радіолокаційних об'єктів на основі алгебри предикатів [7 – 10] та операції створення предикатної моделі семантичної складової для розпізнавання об'єктів локації, що спостерігаються.

Предикати $A(x)$ – це безліч подій сигналів з амплітудами q_{ij} , що перевищили поріг, з характеристикою $(t_{11}, t_{12}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{mn})$, запишуться формулою

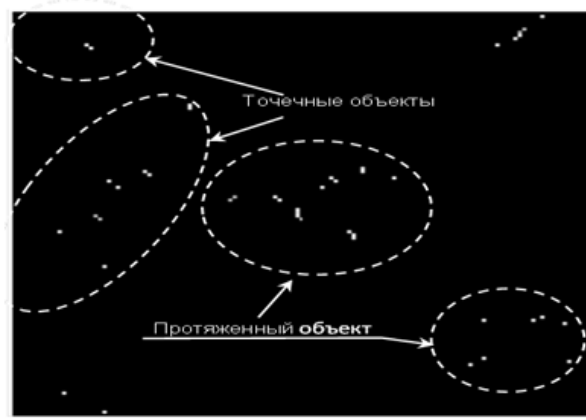
$$A(x) = t_{11}x^{q_{11}} \vee \dots \vee t_{mn}x^{q_{mn}} = \bigvee_{i=1, j=1}^{mn} t_{ij}x^{q_{ij}}, \quad (1)$$

де $x^{q_{ij}}$ – форма впізнавання події, якщо $x = q_{ij}$, то $x^{q_{ij}} = 1$.



А

Рис. 1. Зображення реальних позначок об'єктів радіолокації



А5

Рис. 2. Інтелектуальні зображення радіолокаційних об'єктів

Пропонується система первинних семантичних ознак для опису смислової складової події в інформаційній комірці або між подіями у сусідніх інформаційних комірках та яка дозволяє формалізувати процеси формування інтелектуальної моделі зображення радіолокаційних позначок протягом кількох циклів зондувань РЛС. Для нашого випадку це:

- семантична ознака (унарний предикат) Z_{pij} наявності сигналу в a_{ij} інформаційному осередку (i, j – номери елементів зони огляду РЛС);
- семантичні ознаки (бінарні предикати) сусіднього осередку Z_{dij} та Z_{aij} переходу сигналу з поточного осередку a_{ij} до суміжного осередку за дальністю або азимутом.

Первинні семантичні ознаки формуються за таким правилом:

$$Z_{pij} = 1, \text{ at } A_{ij} > 0 \quad (2)$$

$$Z_{dij} = 1, \text{ at } A_{i-1j} > 0 \wedge Z_{pij} = 1 \quad (3)$$

$$Z_{aij} = 1, \text{ at } Z_{pij} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0. \quad (4)$$

Запропонована система первинних семантичних ознак дозволяє описувати смислові залежності та зв'язки між інформаційними одиницями різного типу. Таким чином, маючи первинні семантичні ознаки, приступаємо до формування інтелектуальної моделі зображень сигнальних позначок для точкових рухомих та малорухомих літальних апаратів типу літак, вертоліт, БПЛА, а саме:

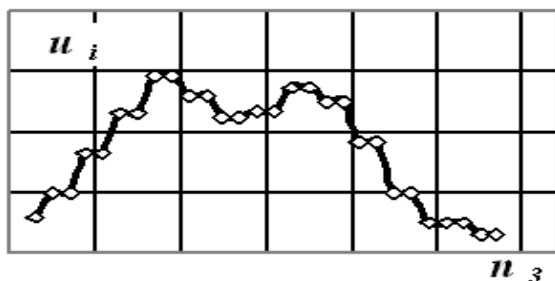
- формування простору семантичних ознак наявності сигналу (предикатів подій) $A = \{A_{11}, A_{12}, \dots, A_{ij}, \dots, A_{mn}\}$ у результаті аналізу амплітуд сигналів згідно з (1);
- формування простору первинних семантичних ознак $Z_{pij}, Z_{dij}, Z_{aij}$ згідно з (2) – (4), що дозволяє здійснювати ознаковий опис зображення позначки об'єкта $\{I(Z_{pij}, Z_{dij}, Z_{aij})\}$ радіолокації на підставі семантичних зв'язків і відносин між подіями в інформаційних осередках в ході формування віртуального просторово-семантичного зображення радіолокаційних позначок;
- формування простору семантичних ознак зображень радіолокаційних позначок $\{I_k(Z_{pij}, Z_{dij}, Z_{aij})\}$ для k об'єктів на основі аналізу залежностей первинних семантичних ознак;
- формування матриці ознакових описів інтелектуальних зображень відміток об'єктів радіолокації, створеної на безлічі $\{I_1, I_2, \dots, I_k\}$ семантичних ознак зображень відміток на

основі геометричної $\{I_{g1}, I_{g2}, \dots, I_{gk}\}$, смислової $\{I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sk}\}$ складових інтелектуальних зображень і семантичної ознаки флуктуації $\{I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fk}\}$ зображень відміток. Матриця розміру $k \times n$ (k рядків, n стовпців). Стовпці цієї матриці відповідають ознакам, наприклад, зображень відміток на основі геометричної $\{I_{g1}, I_{g2}, \dots, I_{gk}\}$, смислової $\{I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sk}\}$ складових інтелектуальних зображень і семантичної ознаки флуктуації $\{I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fk}\}$ зображень відміток, а кожен рядок є ознаковим описом зображення відмітки одного об'єкта радіолокації. На рис. 3 наведено зразок матриці.

| | | |
|----------|----------|----------|
| I_{g1} | I_{s1} | I_{f1} |
| I_{g2} | I_{s2} | I_{f2} |
| ... | ... | ... |
| I_{gk} | I_{sk} | I_{fk} |

Рис. 3. Матриця ознакових описів інтелектуальних зображень об'єктів радіолокації

– формування вектора прийнятих рішень про виявлення та розпізнавання зображень радіолокаційних позначок шляхом логічної обробки простору векторів семантичних ознак $W(I_g, I_s, I_f)$, яке задано на безлічі $\{I_1, I_2, \dots, I_k\}$ семантичних ознак зображень відміток на основі геометричної $\{I_{g1}, I_{g2}, \dots, I_{gk}\}$, смислової $\{I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sk}\}$ складових інтелектуальних зображень та семантичної ознаки флуктуації зображень $\{I_{f1}, I_{f2}, \dots, I_{fk}\}$.



Пачка імпульсів, отражених от воздушного объекта

Рис. 4. Пачка імпульсів, відбитих від літака

Розглянемо ці процеси докладніше. На рис. 4 наведена реальна, експериментально отримана пачка імпульсів, відбитих від літака. Тут дві інформаційні одиниці пов'язані ставленням «причина – наслідок»: ставленням появи сигналу в a_{ij} осередку (це семантична ознака Z_{pij} присутності сигналу); ставленням "сусідньої комірки" (це семантична ознака Z_{aij} переходу сигналу в суміжну за азимутом інформаційну комірку).

Наступним рівнем простору семантичних ознак радіолокаційних зображень об'єктів є семантичні ознаки зображень окремих відміток, що відображають відмітні ознаки процесу формування позначки I_{mk} , наприклад, точкового літального апарату як сукупності первинних семантичних ознак Z_{aij} сусідньої комірки за час ln наявності сигнальних імпульсів пачки. Тут семантична ознака радарної позначки дозволяє отримувати геометричну та смислову інформацію моделі зображення точкового рухомого об'єкта типу літак.

Формування ознакового простору інтелектуальних зображень об'єктів радіолокації

Складасмо семантичні рівняння для поряд розташованих елементів обробки (рис. 4) з умов отримання семантичних ознак Z_{aij} , Z_{pij} і шляхом їх вирішення для наступних дій щодо формування можливого типу інтелектуального зображення позначки, тобто номерів

$k = k_1$ і $l = l_1$ сусіднього елемента обробки за дальністю або азимутом. Визначаємо також, з якими із цих ознак працювати. Для цього при появі семантичної ознаки $Z_{p ij}$ наявності сигналу в a_{ij} інформаційному осередку складаємо семантичні рівняння для перевірки можливості формування семантичної ознаки $Z_{d ij}$ (приходу сигналу із сусідньої за дальністю $a_{i-1 j}$ комірки) або семантичної ознаки $Z_{a ij}$ (переходу сигналу із суміжної за азимутом a_{ij-1} комірки) і отримаємо з умов (3) та (4):

$$(A_{i-1 j} > 0 \wedge Z_{p ij} = 1) = 1 \quad (5)$$

$$(Z_{p ij} = 1 \wedge A_{ij-1} > 0) = 1$$

З аналізу варіантів розв'язків рівнянь (5) можна зробити такі висновки:

1. При виконанні 1-го рівняння формується семантична ознака $Z_{d ij}$, тобто сигнал переходить із сусідньої за дальністю $a_{i-1 j}$ комірки, починає формуватися інтелектуальна модель зображення радарної позначки протяжного об'єкта або імпульсної перешкоди.

2. При виконанні 2-го рівняння формується семантична ознака $Z_{a ij}$, тобто сигнал в досліджувану комірку переходить із сусідньої за азимутом комірки a_{ij-1} і починає формуватися інтелектуальна модель зображення радарної позначки літального апарата, тобто точкового об'єкта типу літак, вертоліт, БПЛА.

3. При виконанні одночасно 1-го та 2-го рівнянь формуються семантичні ознаки $Z_{d ij}$ і $Z_{a ij}$, тобто сигнал в досліджувану комірку переходить з сусідньої за дальністю $a_{i-1 j}$ комірки, і з сусідньої за азимутом a_{ij-1} комірки. У цьому випадку продовжується формування інтелектуальної моделі зображення радіолокаційної позначки протяжного об'єкта.

У цій роботі детальніше вивчимо процес формування інтелектуальної моделі радіолокаційної позначки точкового літального апарату. Спочатку визначимо номер $l = l_1$ поруч розташованого елемента обробки з семантичною ознакою $Z_{a ij}$ сусіднього елемента обробки. Тут l_1 – номер початку пачки інтелектуальної моделі сигнальної позначки для точкового рухомого чи малорухливого об'єкта. Для першого кроку початку формування моделі приймемо $l_1 = 0$.

Виходячи з аналізу варіантів розв'язків рівнянь (6) та з урахуванням аналізу структурних елементів процесної моделі знань щодо виявлення та розпізнавання точкових рухомих об'єктів, на основі інтелектуального аналізу визначаємо черговість наступних процедур (кроків) обробки інтелектуальних зображень відміток об'єктів радіолокації.

На наступному кроці при складанні предикатних рівнянь для знаходження наступного номера $l = l_2$ елемента обробки з подібною семантичною ознакою враховуємо напрямок (a_{ij}, a_{ij+l_1}) формування інтелектуальної моделі пачечної структури сигнальної позначки точкового об'єкта, що позначився на першому кроці. При зміні номера координати l_1 напрямком пошуку збігається з напрямком азимутальної вісі координат j (вправо). Аналіз структурних елементів процесу міжперіодної обробки сигналів оглядових РЛС показує, що спочатку йде заповнення інформаційних комірок за дальністю i , а потім вже йде заповнення інформаційних комірок за азимутом j .

Таким чином, якщо є семантична ознака $Z_{a ij+l_1}$ сусідньої комірки за азимутом, то в наступному кроці обробки перевіряється наявність семантичної ознаки $Z_{a ij+l_2}$ в інформаційній комірці a_{ij+l_2} :

$$Z_{aij+l_2} = (A_{ij} > 0 \wedge Z_{pi+l_2j} = 1) = 1 \quad (6)$$

Вирішуючи рівняння (6), знаходимо значення l_2 . На виконання наступних операцій визначення номерів комірок уточнюємо напрям обчисленням градієнтів номерів за віссю i , тобто $\Delta l_2 = l_2 - l_1$.

При $\Delta l_2 = l_2 - l_1$ отримаємо

$$Z_{aij+l_2+1} = (A_{ij+l_2} > 0 \wedge Z_{pij+l_2+1} = 1) = 1. \quad (7)$$

На n -му кроці визначаємо $\Delta l_n = l_n - l_{n-1}$. Для цього кроку при $\Delta l_n = +1$:

$$Z_{aij+l_n} = (A_{ij+l_{n-1}} > 0 \wedge Z_{pij+l_n} = 1) = 1 \quad (8)$$

В результаті розв'язання системи n семантичних рівнянь (6) – (8) знаходимо всі значення номерів початку та кінця пачок $l_1 \cdots l_n$ та семантичні ознаки смислової I_s та геометричної I_g складових інтелектуального зображення позначки:

$$I_s = Z_{mij} = \bigwedge_{l_1}^{l_n} Z_{ai,j+l_n} = Z_{ai,j+l_1} \wedge Z_{ai,j+l_2} \wedge \cdots \wedge Z_{ai,j+l_{n-1}} \wedge Z_{ai,j+l_n} = 1. \quad (9)$$

З (9) отримуємо вигляд геометричної складової I_g семантичної ознаки інтелектуального зображення рухомого об'єкта на основі безлічі $\{Z_{ai,j+l_1}, Z_{ai,j+l_2}, \dots, Z_{ai,j+l_{n-1}}, Z_{ai,j+l_n}\}$ первинних семантичних ознак відмітки з умови

$$I_g = 1 \text{ при } C1 \leq (l_n - l_1) \leq C2, \quad (10)$$

де $C1$ та $C2$ – мінімальна та максимальна тривалість пачок відміток.

Оскільки аналізований радіолокаційний об'єкт типу літальний апарат точковий і рухомий, то інтелектуальне зображення, що формується, має вигляд протяжної за азимутом позначки з амплітудними флуктуаціями пачки за рахунок доплерівського зміщення несучої частоти РЛС. З урахуванням амплітудних даних $q_{i,j}$ та використовуючи дані про форму згідно з (9), визначаємо ознаку флуктуації як допустиму різницю амплітуд відповідних комірок $\Delta g = q_{max} - q_{min} \geq G1$ амплітуд відповідних комірок:

$$I_f = 1 \text{ при } \Delta g = q_{max} - q_{min} \geq G1. \quad (11)$$

Для оцінки енергетичної ознаки I_e інтелектуальної моделі зображення пачки сигналів введено поняття накопиченої енергії [11] як суми амплітуд сигналів на їх предикати інформаційних комірок пачки у напрямку, що визначається вектором (l_n) розв'язків рівнянь (6) – (8). З урахуванням розподілу амплітуд $q_{i,j}$ у межах пачки визначаємо енергетичну ознаку пачки сигналів (позначок) рухомих повітряних об'єктів як сумарну амплітуду:

$$I_e = \sum_{l_1}^{l_n} q_{i,j+l_n} Z_{ai,j+l_n}. \quad (12)$$

Таким чином, шляхом аналізу рішень рівнянь (6) – (8), аналізу процедур отримання семантичних ознак смислової I_s (9), геометричної I_g (10), енергетичної I_e (12) складових інтелектуального зображення позначки та семантичної ознаки флуктуації I_f (11) можна скласти структуру та перелік процедурних та семантичних операцій формування та обробки інтелектуальних моделей зображень радіолокаційних об'єктів.

Види інтелектуальних зображень об'єктів радіолокації, отримані в результаті модельних експериментів, наведено на рис. 2.

Висновки

Отримано такі результати та їх новизна:

1. Нові інтелектуальні моделі зображень відміток, придатних для автоматичного прийняття рішення про виявлення та розпізнавання відміток радіолокаційних об'єктів.
2. Нові технології опису смислової залежності та зв'язки між інформаційними одиницями моделі зображень відміток для точкових рухомих та малорухомих літальних апаратів типу літак, вертоліт, БПЛА на основі нових первинних семантичних ознак.
3. Нові простори семантичних ознак на основі геометричної, процесної складових і флуктуацій відміток для опису зображень відміток об'єктів радіолокації.

Список літератури:

1. 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 : Изд-во СМИТ, 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. Solonskaya S.V., Zhirnov V.V. Intelligent analysis of radar data based on fuzzy transforms // Telecommunications and Radio Engineering (English translation of Elektrosvyaz and Radiotekhnika). 2018. 77 (15). Pp. 1321 – 1329.
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. № 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. № 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, Iss. 17. P. 1513 – 1519. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v79.i17.20.
11. Advanced Methods and Deep Learning in Computer Vision. 1st Edition / Ed.: E. R. Davies, Matthew Turk. Academic Press, 2021. Page Count: 586. ISBN: 9780128221099.

Надійшла до редколегії 07.02.2023

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; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2397-3126>

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