

УДК 519.826.5

**І. М. НІКОЛАЄВ**, кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник

(Харківський національний університет  
Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, м. Харків)

## **Математична модель комплексного розпізнавання повітряних радіовипромінюючих об'єктів за сукупністю параметрів сигналів бортових радіолокаційних станцій і засобів радіозв'язку в системах радіоелектронного спостереження**

Наведені структура, алгоритми, принципи побудови і використання імітаційно-математичної моделі розпізнавання повітряних об'єктів за параметрами випромінювань бортових радіоелектронних засобів у системах радіоелектронного спостереження при великих розмірах алфавіту класів об'єктів, що підлягають розпізнаванню, і словника їхніх сигнальних ознак. Показано, що модель дозволяє реалізувати багатократне повторення процесу розпізнавання радіовипромінюючих об'єктів за сукупністю параметрів сигналів бортових радіолокаційних станцій і засобів радіозв'язку, змінювати в діалоговому режимі умови моделювання і отримувати оцінки імовірності розпізнавання в залежності від процедури прийняття рішень, розміру і складу алфавіту класів об'єктів, що розпізнаються, складу і точності виміру сигнальних ознак, повноти і достовірності апріорних баз даних та інших чинників.

Ключові слова: імітаційно-математична модель, повітряний об'єкт, джерело радіовипро-

мінювання, параметри випромінювання, алгоритм розпізнавання, алфавіт класів, словник сигнальних ознак, радіоелектронний засіб, засіб радіозв'язку, ефективність розпізнавання.

Приведены структура, алгоритмы, принципы построения и использования имитационно-математической модели распознавания воздушных объектов по параметрам излучений бортовых радиоэлектронных средств в системах радиоэлектронного наблюдения при больших размерах алфавита распознаваемых классов объектов и словаря их сигнальных признаков. Показано, что модель позволяет реализовать многократное повторение процесса распознавания радиоизлучающих объектов по совокупности параметров сигналов бортовых радиолокационных станций и средств радиосвязи, изменять в диалоговом режиме условия моделирования и получать оценки вероятности распознавания в зависимости от процедуры принятия решений, размера и состава алфавита распознаваемых классов объектов, состава и точности измерения сигнальных признаков, полноты и достоверности априорных баз данных и других факторов.

Ключевые слова: имитационно-математическая модель, воздушный объект, источник радиоизлучения, параметры излучения, алгоритм распознавания, алфавит классов, словарь сигнальных признаков, радиоэлектронное средство, средство радиосвязи, эффективность распознавания

Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності протиповітряної оборони (ППО) є використання в складі єдиного інформаційно-розвідувального поля сучасних швидкодіючих засобів радіоелектронного спостереження, що забезпечують перехоплення, розпізнавання, виявлення і супроводження цілей за випромінюваннями бортових радіоелектронних засобів (РЕЗ), які встановлюються на борту сучасних літальних апаратів (ЛА) військового і цивільного призначення [1, 2]. Ідентифікація ЛА за параметрами випромінювання їхніх бортових РЕЗ вимагає розробки спеціалізованих систем розпізнавання, що повинні реалізовувати найбільш ефективний (оптимальний) алгоритм прийняття рішень при заданому словнику сигнальних ознак [3]. При великих розмірах алфавіту класів (типів) ЛА і словника сигнальних ознак це завдання може бути виконане на основі інформаційної технології комп'ютерного імітаційно-математичного моделювання, яка дозволяє реалізувати ітеративну процедуру послідовного наближення системи розпізнавання, що розробляється, до потенційно досяжної і оцінити її ефективність у різних умовах функціонування. Реалізація цієї технології вимагає використання імітаційно-математичної моделі (ІММ), що дозволяє реалізувати багатократне повторення процесу розпізнавання ЛА і бортових РЕЗ для кожного з класів (типів) заданого алфавіту [4, 5, 6]. Отримана в результаті випробувань множина випадкових результатів рішення задачі розпізнавання дає можливість, спираючись на методи математичної статистики, визначити оцінки ймовірності помилкових і правильних рішень, а також встановити характер залежності ефективності системи розпізнавання, що розробляється, від ряду чинників, що впливають на цей процес.

**Метою** статті є опис структури, алгоритмів і принципів застосування імітаційно-математичної моделі (ІММ) проведення досліджень ефективності комплексного розпізнавання радіовипромінюючих цілей за сукупністю параметрів сигналів бортових радіолокаційних станцій (БРЛС) і засобів радіозв'язку (ЗРЗ) при великих розмірах алфавіту класів, що підлягають розпізнаванню, та словника їх сигнальних ознак.

Теоретичні основи розпізнавання будь-яких об'єктів розглянуті в роботах [4, 5, 7–9]. Проблема розпізнавання радіовипромінюючих повітряних об'єктів у засобах радіоелектронного спостереження, пасивної локації й радіотехнічної розвідки розглядається в [1–3, 10–12]. Зокрема, у роботах [1, 2] розглянуті теоретичні основи селекції і вимірювання параметрів сигналів, розпізнавання джерел випромінювань, методи побудови типових радіоелектронних систем пасивного радіоелектронного спостереження, моделювання і оцінки ефективності засобів спостереження. У статті [3] розглянуті особливості розпізнавання джерел радіовипромінювання та їх носіїв в трикоординатному базово-кореляційному комплексі пасивної локації. У монографії [11] систематизовані завдання повітряної радіотехнічної розвідки, розглянута специфіка і наведені показники ефективності розпізнавання наземних РЛС апаратурою радіотехнічної розвідки з борту літального апарата. У монографії [10]

наводиться аналіз джерел радіовипромінювання, а також математичні моделі їх описів, методи ухвалення рішень щодо ідентифікації об'єктів радіовипромінювань, розглядаються сучасні засоби виявлення радіосигналів з використанням акусто-оптичних аналізаторів спектра і методи їх обробки. У той же час, у відомій науково-технічній літературі відсутні публікації, спрямовані на рішення задачі оцінки ефективності систем розпізнавання радіовипромінюючих джерел і об'єктів у системах радіоелектронного спостереження, у тому числі з використанням сучасних інформаційних технологій.

Інтегральним показником ефективності  $W$  функціонування будь-якої системи розпізнавання є ймовірність отримання правильних рішень при розпізнаванні об'єктів, що відносяться до усіх класів заданого алфавіту [4, 5]. Стосовно задачі розпізнавання повітряних об'єктів за сукупністю параметрів випромінювання бортових радіоелектронних засобів цей показник може бути представлений функціоналом такого виду:

$$W = F[A_{\text{ЛА}} = \{A_1, A_2, \dots, A_L\}; R_{\text{РЛС}} = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}; C_{\text{ЗРЗ}} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}; \\ A_{\text{РЛС}} = \{\alpha_{iv}\}, i = \overline{1, n}, v = \overline{1, N}; A_{\text{ЗРЗ}} = \{\beta_{k\mu}\}, k = \overline{1, m}, \mu = \overline{1, q}; \quad (1) \\ \Sigma_{\text{РЛС}} = \{\sigma_v\}; \Sigma_{\text{ЗРЗ}} = \{\sigma_\mu\}; \{\Delta A_{\text{РЛС}}(\alpha_{iv})\}; \{\Delta A_{\text{ЗРЗ}}(\beta_{k\mu})\}; \|P_{ij}\|,$$

де  $\{A_1, A_2, \dots, A_L\}$  – алфавіт класів ЛА;  $R_{\text{РЛС}} = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$  – алфавіт класів БРЛС ЛА;  $C_{\text{ЗРЗ}} = \{C_1, C_2, \dots, C_m\}$  – алфавіт класів випромінювань бортових ЗРЗ ЛА;  $A_{\text{РЛС}} = \{\alpha_{iv}\}, i = \overline{1, n}, v = \overline{1, N}$  – апріорний словник сигнальних ознак БРЛС;  $A_{\text{ЗРЗ}} = \{\beta_{k\mu}\}, k = \overline{1, m}, \mu = \overline{1, q}$  – апріорний словник сигнальних ознак класів випромінювань ЗРЗ;  $\Sigma_{\text{РЛС}} = \{\sigma_v\}, \Sigma_{\text{ЗРЗ}} = \{\sigma_\mu\}$ ; – середньоквадратичні помилки (СКП) визначення ознак бортових РЛС і ЗРЗ відповідно;  $\{\Delta A_{\text{РЛС}}(\alpha_{iv})\}, \{\Delta A_{\text{ЗРЗ}}(\beta_{k\mu})\}$  – помилки апріорного опису класів бортових РЛС і класів випромінювань ЗРЗ відповідно;  $\|P_{ij}\|$  – матриця ймовірності правильних і помилкових рішень.

Для опису класів ЛА в моделі використовується вектор сигнальних ознак

$$A_l = \{A_{il}(\alpha_v), A_{kl}(\beta_\mu)\}, l = \overline{1, L}, i = \overline{1, n}, k = \overline{1, m}, \quad (2)$$

де  $A_{il}(\alpha_v), l = \overline{1, L}, i = \overline{1, n}$ , – вектор сигнальних ознак, пов'язаних з параметрами випромінювань бортових РЛС ЛА  $l$ -го класу,  $L$  – кількість класів ЛА,  $n$  – кількість класів БРЛС;  $A_{kl}(\beta_\mu), l = \overline{1, L}, k = \overline{1, m}$ , – вектор сигнальних ознак, пов'язаних з параметрами випромінювань бортових засобів радіозв'язку ЛА  $l$ -го класу,  $m$  – кількість класів випромінювань бортових ЗРЗ.

Компоненти вектора (2) використовуються в ІММ для дослідження ефективності роздільного розпізнавання класів (типів) бортових РЛС і класів випромінювань ЗРЗ, а також ефективності комплексного розпізнавання класів ЛА при переведенні ІММ у відповідний режим функціонування.

ІММ для забезпечення можливості дослідження ефективності комплексного розпізнавання класів (типів) ЛА за параметрами радіовипромінювань їх бортових РЛС і ЗРЗ повинна містити:

блок модулів (алгоритмів) розпізнавання;

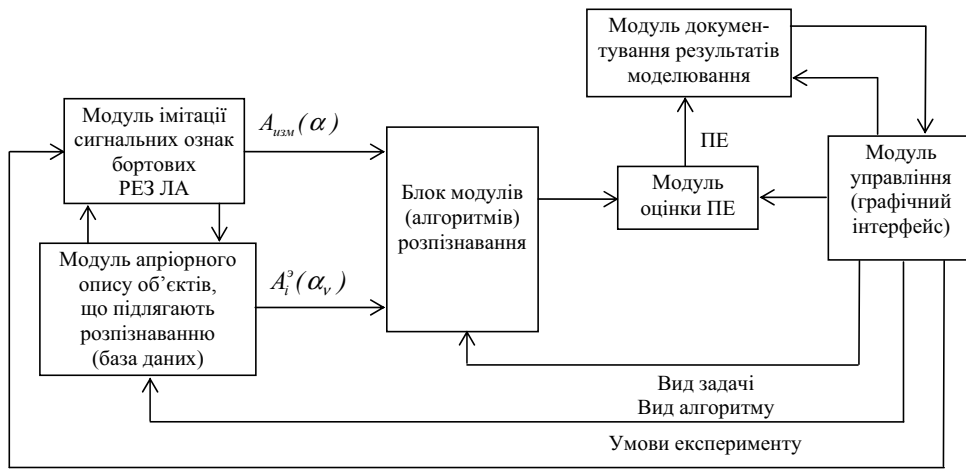


Рис. 1. Структурна схема імітаційно-математичної моделі

базу даних апіорного опису класів ЛА на обраній мові сигнальних ознак;

блок (модуль) імітації випадкових реалізацій сигнальних ознак;

модуль оцінки показників ефективності (ПЕ);

модуль управління процесом моделювання.

Структурна схема IMM зображена на рис. 1.

Для забезпечення можливості формування структури системи розпізнавання класів (типів) ЛА за сукупністю сигнальних ознак, пов'язаних з параметрами випромінювань бортових РЛС і ЗРЗ, в IMM розроблені і реалізовані такі алгоритми [4, 5, 7–9, 13]:

статистичний алгоритм максимуму апостеріорної імовірності;

емпіричний алгоритм;

алгоритми розпізнавання за мінімумом відстані Махаланобіса, мінімумом відстані Евкліда і мінімумом відстані Хеммінга;

логічний та імовірнісний алгоритми об'єднання рішень, що приймаються якою-небудь сукупністю заздалегідь вибраних алгоритмів з вказаних вище.

Вказані алгоритми дозволяють дослідити ефективність:

1) одноступінчатої процедури прийняття рішення про клас (тип) повітряного об'єкта (ЛА), що спостерігається, за складеним вектором сигнальних ознак, який містить параметри радіовипромінювань бортових РЛС і ЗРЗ;

2) двоступінчатої процедури роздільного розпізнавання бортових РЛС і ЗРЗ на першому ступені і наступного розпізнавання класу ЛА за типами бортових РЛС і класами випромінювань ЗРЗ, що розпізнані, на другому ступені.

Крім того, в моделі реалізована одноступінчата процедура розпізнавання ЛА на основі алгоритму обчислення оцінок (АОО) близькості прийнятого вектора сигнальних ознак з еталонними описами заданого алфавіту класів ЛА, що підлягають розпізнаванню.

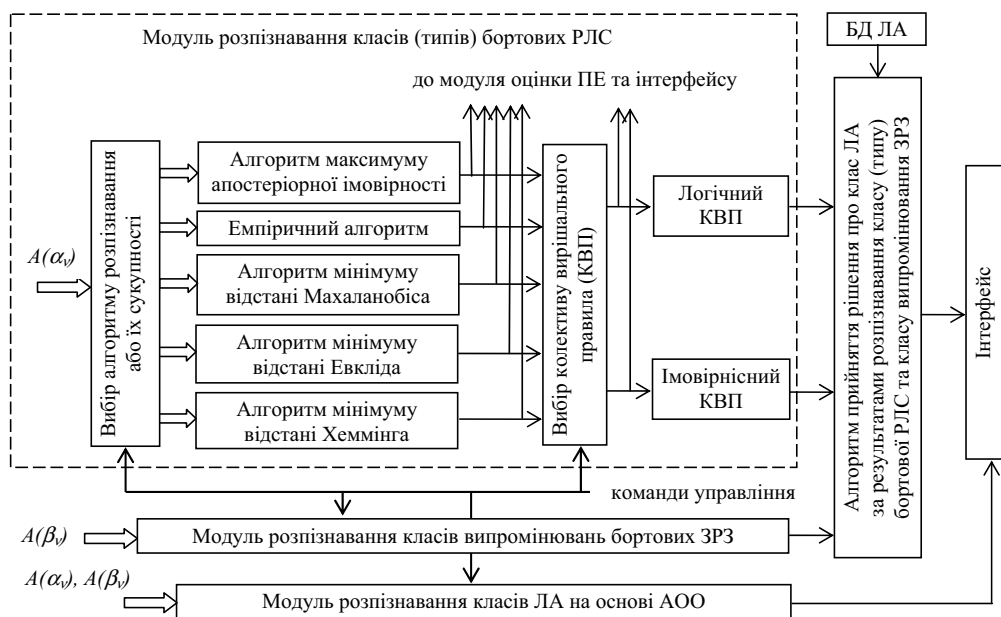


Рис. 2. Структура блока (модуля) алгоритмів розпізнавання

Реалізація вказаних алгоритмів і процедур забезпечується блоком алгоритмів (модулів) розпізнавання, структура якого може змінюватися залежно від виду вирішуваної задачі (рис. 2). Основними елементами цього блока є модуль розпізнавання класів (типів) бортових РЛС, модуль розпізнавання класів випромінювань ЗРЗ і модуль розпізнавання ЛА на основі алгоритму АОО.

Перші два модулі ідентичні і складаються з п'яти програмно реалізованих алгоритмів розпізнавання бортових РЛС (або класів випромінювань ЗРЗ) і двох колективів вирішальних правил (КВП), які реалізують відповідно логічну і імовірнісну процедури об'єднання рішень, що приймаються будь-якою сукупністю заздалегідь вибраних алгоритмів з вказаних вище. Функціонування блока модулів розпізнавання забезпечується програмно реалізованим модулем (базою даних), яка містить еталонні описи класів (типів) ЛА, класів (типів) бортових РЛС і класів випромінювань ЗРЗ, що підлягають розпізнаванню, на мові апріорних словників сигнальних ознак, пов'язаних з параметрами випромінювань бортових РЛС і ЗРЗ.

Функціонування блока модулів розпізнавання забезпечується програмно реалізованим модулем (базою даних), що містить еталонні описи класів (типів) ЛА, класів (типів) БРЛС і класів випромінювань ЗРЗ, які підлягають розпізнаванню, на мові апріорних словників сигнальних ознак, пов'язаних з параметрами випромінювань БРЛС і ЗРЗ. Джерелом інформації для складання апріорних алфавітів класів і апріорних словників сигнальних ознак є відомості про функціональне призначення, бортове обладнання, режими застосування ЛА військового і цивільного призначення, що опубліковані в періодичних науково-технічних виданнях і довідниках, у тому числі в мережі Інтернет [14–17].

Як апріорний словник сигнальних ознак, пов'язаних з параметрами випромінювань бортових РЛС, у моделі використовуються: діапазон робочих частот; вид модуляції, тривалість і ширина спектра випромінюваного сигналу; період повторення імпульсів; діапазон перебудування робочої частоти від імпульсу до імпульсу; тривалість пачки імпульсів; період повторення пачок імпульсів; тривалість циклу сканування; ознака режиму роботи бортової РЛС та інші параметри, що обумовлені алгоритмами функціонування передавальних пристроїв і антенних систем БРЛС ЛА.

Як апріорний словник сигнальних ознак ЛА, пов'язаних з випромінюваннями бортових ЗРЗ, у моделі використовуються діапазон робочих частот; кількість і значення частот передачі; час одноразового використання частоти; ширина спектра передачі на одній частоті; вид модуляції (амплітудна модуляція, амплітудна маніпуляція, частотна модуляція, частотна маніпуляція, фазова модуляція, фазова маніпуляція); вид випромінюваного сигналу (аналоговий; цифровий); швидкість і вид передачі (телефонія, телеграф, передача даних); параметри, що характеризують структуру повідомлення (наявність і вид службового, адресного та інформаційного фрагментів повідомлення, структура синхрогруп і службових комбінацій); параметри, що характеризують

структуру повідомлень ЗРЗ з часовим розподілом каналів (тривалість кадру, тривалість циклу, кількість кадрів у циклі); кількість позицій модульованого сигналу з фазовою модуляцією (ФМ-2, -4, -8); швидкість маніпуляції для сигналів з ФМ-2, -4, -8 та інші параметри.

Апріорні словники є основою для формування робочих словників сигнальних ознак ЛА за результатами моделювання.

Для апріорного опису класів (типів) бортових РЛС і ЗРЗ в ІММ використовуються інтервали можливих значень вказаних вище параметрів:  $\alpha_v \in [\alpha_v^{max}, \alpha_v^{min}]$ ,  $v = 1, 2, \dots, N$ , де  $\alpha_v^{max}$ ,  $\alpha_v^{min}$  – максимальне і мінімальне значення  $V$ -го параметра (ознаки), оскільки конкретні значення параметрів випромінювань бортових РЛС і ЗРЗ у момент спостереження (прийому) є невідомими і можуть розглядатися як рівномірні. Рішення про належність об'єкта (джерела радіовипромінювання), що спостерігається, до одного з класів бортових РЛС заданого алфавіту  $R_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , формується в моделі за результатами обробки вектора  $A_{uzm}(\alpha)$ , компонентами  $\{\alpha_{iv}\}$  якого є виміряні значення параметрів прийнятого сигналу. У процесі моделювання компоненти вектора  $A_{uzm}(\alpha)$  набувають випадкових значень, що формуються за допомогою датчиків випадкових чисел відповідно до заданих значень середньоквадратичних помилок їх вимірювання.

Предбачається, що апріорна імовірність  $P(R_i)$  появи бортової РЛС із заданого алфавіту класів є відомою, а помилки виміру  $\delta\alpha_v$  параметрів її випромінювання розподілені за нормальним законом з нульовим середнім і дисперсією  $\sigma_v$ . У цьому випадку умовну щільність розподілу  $p(A_{uzm}(\alpha)/R_i)$  можна представити у вигляді композиції рівномірного і нормального законів [8, 9]. За умови, що параметри  $\alpha_{iv}$  статистично незалежні, рішення про належність вхідного вектора  $A_{uzm}(\alpha)$  до одного з класів (типів) БРЛС формується на основі критерію максимуму апостеріорної імовірності [3, 13]

$$j_{omn}(A_{uzm}/\alpha) = \arg \max_{i=1..n} p(A_{uzm}(\alpha)/R_i)P(R_i); \quad (3)$$

$$p(A_{uzm}(\alpha)/R_i) = \prod_{v=1}^N \frac{1}{\alpha_{iv}^{max} - \alpha_{iv}^{min}} \left[ \Phi\left(\frac{\alpha_{iv}^{max} - \alpha_{v,uzm}}{\sigma_v}\right) - \Phi\left(\frac{\alpha_{iv}^{min} - \alpha_{v,uzm}}{\sigma_v}\right) \right], \quad (4)$$

де  $\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^u e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – інтеграл імовірності;  $u = \frac{\alpha_{iv} - \alpha_{v,uzm}}{\sigma_v}$  – аргумент функції Лапласа.

Статистичний алгоритм розпізнавання БРЛС за вектором сигнальних ознак  $A_{uzm}(\alpha) = \{\alpha_{iv}\}$  полягає в обчисленні зважених добутоків умовної апостеріорної імовірності потрапляння параметрів прийнятого сигналу в інтервали  $[\alpha_{iv}^{min}, \alpha_{iv}^{max}]$ , обрані для апріорного опису класів БРЛС заданого алфавіту, порівнянні цієї імовірності між собою і прийнятті рішення про належність об'єкта, що спостерігається, до класу  $j_{omn}(A_{uzm})$ ,  $j = 1, 2, \dots, n$ , для якого відповідна імовірність є максимальною. Цей алгоритм справедливий для випадку нульових втрат при правильній класифікації, рівності втрат при всіх видах неправильної класифікації і рівності апріорної імовірності появи БРЛС різних класів.

Якщо БРЛС ЛА функціонують у режимах, що відрізняються видом і параметрами випромінюваних сигналів, то кожен клас БРЛС має бути описаний декількома (за числом режимів роботи) еталонними векторами  $A_{ik}^{\alpha}$  сигнальних ознак. Тоді оптимальне вирішальне правило, відповідно до якого вектор вимірних ознак має бути віднесений до одного з класів БРЛС, визначається формулою

$$j_{omn}(A_{uzm} / \alpha) = \arg \max_{i=1..n} \max_{k=1..m_i} P(R_{ik}) \prod_{v=1}^N \varphi_{ik}(A_{uzm} / \alpha), \quad (5)$$

де  $n$  – число класів БРЛС,  $m_i$  – число режимів БРЛС, що відносяться до  $i$ -го класу,  $P(R_{ik})$  – апіорна імовірність появи  $k$ -го режиму БРЛС  $i$ -го класу.

Недоліком статистичного алгоритму є те, що в більшості практичних випадків апіорні дані про БРЛС, що підлягають розпізнаванню, відсутні. Найбільші складнощі пов'язані з отриманням даних, що дозволяють задати функції правдоподібності  $p(A_{uzm}(\alpha) / R_i)$ . Від вказаного недоліку вільний реалізований у моделі емпіричний алгоритм, в основі якого лежить процедура перевірки умов потрапляння значення (оцінки)  $\hat{\alpha}_{iv}$  параметра прийнятого сигналу у відповідний інтервал («строб» розпізнавання)  $[\alpha_{iv}^{min}, \alpha_{iv}^{max}]$ :

$$j_{omn}(A_{uzm}) = \arg (A_{uzm}(\alpha) \in [A_i^{min}, A_i^{max}]), \quad (6)$$

Порогові значення стробів розпізнавання  $[\alpha_{iv}^{min}, \alpha_{iv}^{max}]$ ,  $i = \overline{1, n}$ ,  $v = \overline{1, N}$ , встановлюються відповідно до правил

$$\alpha_{iv}^{min} = \alpha_{iv}^{min \alpha} - \varepsilon \sigma_v; \quad (7)$$

$$\alpha_{iv}^{max} = \alpha_{iv}^{max \alpha} + \varepsilon \sigma_v, \quad (8)$$

де  $[\alpha_{iv}^{min \alpha}, \alpha_{iv}^{max \alpha}]$  – еталонні порогові значення  $v$ -ї ознаки (параметра),  $\sigma_v$  – СКП виміру  $v$ -го параметра прийнятого сигналу;  $\varepsilon$  – коефіцієнт розширення стробів розпізнавання  $[\alpha_{iv}^{min}, \alpha_{iv}^{max}]$ .

Окрім статистичного і емпіричного алгоритмів у моделі реалізовані алгоритми розпізнавання, засновані на оцінці міри близькості образів об'єктів, що розпізнаються. До них відноситься алгоритм розпізнавання за мінімумом відстані Махаланобіса, згідно з яким рішення про клас об'єкта (джерела випромінювання), що спостерігається, приймається відповідно до правила

$$j_{omn}(A_{uzm}(\alpha)) = \arg \min_i [(A_{uzm}(\alpha) - A_i^{\alpha})^T K_A^{-1} (A_{uzm}(\alpha) - A_i^{\alpha})], \quad (9)$$

де  $K_A^{-1}$  – зворотна матриця помилок виміру сигнальних ознак.

Якщо складові  $\alpha_{iv}$  вектора  $A_{uzm}(\alpha)$  є взаємно незалежними, то цей алгоритм може бути поданий у виді

$$j_{omn}(A_{uzm}) = \arg \min_{i=1..n} \sum_{v=1}^N \frac{(\alpha_{vuzm} - \alpha_{iv}^{\alpha})^2}{\sigma_v^2}, \quad (10)$$

де  $\sigma_v^2$  – дисперсія помилки виміру  $v$ -го параметра,  $\alpha_{iv}^{\alpha}$  – еталонне значення  $v$ -го параметра сигналу БРЛС  $i$ -го класу (типу).

Рішення про клас джерела радіовипромінювання, що спостерігається, відповідно до критерію мінімуму відстані полягає в обчисленні сукупності зважених

квадратів відстаней  $A_{uzm}(\alpha) - A_i^{\alpha}$  і віднесенні вектора вимірних ознак до того класу (типу) БРЛС, для якого ця відстань є мінімальною.

За аналогічним принципом в моделі реалізовані:

б) алгоритм розпізнавання за мінімумом відстані Евкліда

$$j_{omn}(A_{uzm}) = \arg \min_{i=1..n} \sum_{v=1}^N (\alpha_{vuzm} - \alpha_{iv}^{\alpha})^2; \quad (11)$$

б) алгоритм розпізнавання за мінімумом відстані Хеммінга

$$j_{omn}(A_{uzm}) = \arg \min_{i=1..n} \sum_{v=1}^N |\alpha_{vuzm} - \alpha_{iv}^{\alpha}|. \quad (12)$$

Для підвищення розрізнюваності БРЛС простір ознак моделі перетворюється в безрозмірний за допомогою нормування:

$$x'_j = \frac{x_j - x_{jmin}}{x_{jmax} - x_{jmin}}. \quad (13)$$

При такому нормуванні відстані між класами (типами) БРЛС в безрозмірному просторі ознак змінюються, але залишаються пропорційними початковим даним, а значення кожної ознаки лежить в діапазоні  $[0; 1]$ .

Модель дозволяє оцінити ефективність використання колективів вирішальних правил, призначених для підвищення якості роботи системи розпізнавання бортових РЕЗ за частотно-часовим параметрам випромінювань. Реалізовані в моделі КВП забезпечують логічне або імовірнісне об'єднання рішень, що формуються вказаними вище алгоритмами розпізнавання.

Комплексне розпізнавання ЛА за сукупністю параметрів випромінювання бортових РЛС і ЗРЗ реалізується логічним алгоритмом на основі об'єднання рішень, що формуються модулем розпізнавання типів БРЛС і модулем розпізнавання класів випромінювань ЗРЗ. Модуль розпізнавання класів випромінювань бортових ЗРЗ функціонує аналогічно описаному вище з тією відмінністю, що на його вхід надходить вектор ознак, який містить результати виміру параметрів сигналів ЗРЗ у відповідному форматі.

Модуль розпізнавання ЛА на основі алгоритму обчислення оцінок близькості (АОО) формує рішення про клас об'єкта, що спостерігається, за результатами обробки вектора сигнальних ознак, який складається з параметрів випромінювань бортових РЛС і ЗРЗ. У основу побудови цього алгоритму покладена запропонована Ю. І. Журавльовим модель алгоритмів розпізнавання, заснованих на обчисленні оцінок [18, 19]. Як вирішальне правило використовується максимальна оцінка міри подібності ознак ЛА, що спостерігається, з еталонними описами класів (типів) ЛА заданого алфавіту  $\Lambda_{li}$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$ .

**Принцип дії ІММ** полягає в тому, що для проведення кожного випробування за допомогою модуля імітації формується модель радіовипромінюючого об'єкта, належність якого до певного класу БРЕЗ або ЛА заздалегідь відома. Модель радіовипромінюючого об'єкта задається у вигляді випадкових реалізацій векторів сигнальних ознак заданої розмірності й складу, чисельні

значення яких формуються з урахуванням точності і законів розподілу помилок виміру цих ознак у прийнятному пристрої засобу радіоелектронного спостереження (системи пасивної локації). Формування елементів вектора параметрів прийнятого сигналу від об'єкта  $i$ -го класу в  $k$ -му циклі розпізнавання здійснюється відповідно до правила

$$\alpha_{iv}^{im} [k] = \alpha_{iv}^{min} [k] + (\alpha_{iv}^{max} [k] - \alpha_{iv}^{min} [k])\delta [k], \quad v = 1, 2, \dots, N; \quad (14)$$

$$\hat{\alpha}_{iv} [k] = \alpha_{iv}^{im} [k] + \sigma_v \mu [k], \quad v = 1, 2, \dots, N, \quad (15)$$

де  $\delta$  – випадкове число, сформоване за рівномірним законом у діапазоні (0–1),  $\mu$  – випадкове число, розподілене за нормальним законом з нульовим математичним сподіванням і одиничною дисперсією,  $\sigma_v$  – СКП вимірювання  $v$ -го параметра.

У результаті в кожному циклі розпізнавання модуль імітації формує вектор випадкових сигнальних ознак  $A_i^{im}(\alpha_{iv}^{im} [k])$  заданого класу, який надходить на вхід блока алгоритмів розпізнавання. Блок розпізнавання відповідно до вибраного вирішального правила (алгоритму або сукупності алгоритмів) визначає належність об'єкта до одного з класів (типів) заданого алфавіту. Рішення, сформовані досліджуваними алгоритмами, надходять на вхід модуля оцінки показників ефективності (ПЕ).

Модуль оцінки ПЕ розпізнавання забезпечує:

реєстрацію в кожному циклі розпізнавання імітованих векторів ознак бортових РЕЗ і/або ЛА та їх істинної належності до того або іншого класу (типу) відповідного алфавіту;

реєстрацію прийнятих рішень про належність імітованого вектора ознак до того або іншого класу (типу) БРЛС, класу випромінювання ЗРЗ і/або класу ЛА заданого алфавіту за результатами рішення задачі розпізнавання;

підрахунок числа можливих результатів експериментів з розпізнавання об'єктів заданих алфавітів і визначення заданих показників якості функціонування досліджуваних алгоритмів.

Оцінкою імовірності правильного рішення служить відношення кількості правильних рішень  $N_{ii}$  до загального числа випробувань  $N_i$  над об'єктами  $i$ -го класу (типу):  $P_{ii} = N_{ii} / N_i$ . Оцінка імовірності помилкового рішення, коли об'єкт  $i$ -го класу (типу) відноситься до  $j$ -го типу (класу), визначається як  $P_{ij} = N_{ij} / N_i$ ,  $i \neq j$ , де  $N_{ij}$  – число відповідних результатів при рішенні задачі розпізнавання.

Генерування випадкових реалізацій сигнальних ознак ЛА всіх  $M$  класів (типів) дозволить отримати матрицю  $\|P_{ij}\|$ , діагональні елементи ( $P_{ij}, i = j$ ) якої характеризують імовірність правильного розпізнавання, а недіагональні ( $P_{ij}, i \neq j$ ) – імовірність помилок розпізнавання.

Число випробувань визначається довірчою імовірністю, яка задається при формулюванні завдання дослідження.

Початковими даними для моделювання є:

склад і розмірність алфавітів класів (типів) БРЛС, класів випромінювань ЗРЗ або класів (типів) ЛА;  
склад і розмірність вектора сигнальних ознак бортових РЕЗ і значення СКП їх вимірювання;  
вид і структура досліджуваного алгоритму;  
кількість статистичних випробувань (прогонів моделі).

ІММ дозволяє досліджувати залежність ефективності проектованої системи розпізнавання від розмірів і складу алфавітів класів (типів) джерел і об'єктів, що розпізнаються, повноти і точності їхнього апріорного опису, виду, кількості, складу і точності виміру сигнальних ознак. Для вирішення вказаних задач ІММ забезпечує:

вибір виду досліджуваної задачі (розпізнавання БРЛС, розпізнавання класів випромінювань ЗРЗ, розпізнавання ЛА);

вибір структури вирішального правила (алгоритму розпізнавання);

завдання складу алфавіту об'єктів і словника їх сигнальних ознак;

оцінку і реєстрацію (документування) імовірності помилкових і правильних рішень.

Взаємодія дослідника (оператора) з моделлю здійснюється за допомогою модуля управління, програмно реалізованого у вигляді графічного інтерфейсу. Графічний інтерфейс ІММ системи розпізнавання забезпечує:

управління процесом моделювання;

відображення на екрані монітора початкових даних і результатів моделювання, режимів функціонування моделі, складу і змісту розпізнаваних алфавітів і словників сигнальних ознак, виду досліджуваного алгоритму і інших умов проведення експериментів;

введення значень апріорної імовірності БРЛС і/або ЛА;

введення і редагування еталонних описів об'єктів, що підлягають розпізнаванню, у метриках обраних сигнальних ознак;

відображення значень (для кожного алфавіту класів і набору ознак розпізнавання) показника ефективності розпізнавання.

Вибір алгоритмів розпізнавання і завдання умов моделювання здійснюється за допомогою вікна основного меню і інструментальної панелі.

**Висновки.** Представлена структура ІММ забезпечує моделювання процесу багаторівневого розпізнавання бортових РЕЗ і ЛА за сукупністю параметрів випромінюваних сигналів, в якій для кожної конкретної задачі в режимі діалогу формуються різні варіанти початкових даних і умов розпізнавання.

Метою подальших досліджень є оцінка ефективності розпізнавання ЛА залежно від складу алфавітів класів (типів) БРЛС, видів випромінювань ЗРЗ і класів (типів) ЛА, складу, інформативності і точності виміру сигнальних ознак радіовипромінювань БРЕЗ, повноти і достовірності апріорних баз даних та інших чинників. Застосування ІММ забезпечує отримання даних для порівняльного аналізу ефективності процедур прийняття рішень при розпізнаванні повітряних об'єктів за

сукупністю параметрів випромінювання бортових радіоелектронних засобів при великих розмірах алфавіту розпізнаваних класів і словника сигнальних ознак, що дозволяє істотно скоротити витрати часу на оптимізацію розмірів алфавітів і словників ознак розпізнаваних класів (типів) радіовипромінюючих джерел і об'єктів на ранніх стадіях проектування подібних систем.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Байлов В. В., Плаксиенко В. С. Средства радиоэлектронного наблюдения : учеб. пособие. Таганрог : Изд-во ТТИ, 2009. 104 с.
2. Гряник В. Н., Павликов С. Н., Убанкин Е. И. Средства радиоэлектронного наблюдения. Владивосток : ВГУЭС, 2006. 200 с.
3. Перетягин И. В., Канцедал В. М., Николаев И. М., Грачев В. М. Особенности распознавания бортовых источников радиоизлучений и их носителей в трехкоординатном базово-корреляционном комплексе РТР. ВСРЭ, 2002. С. 45–52.
4. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Построение систем распознавания. М. : Сов. радио, 1974. 224 с.
5. Горелик А. Л., Скрипкин В. А. Методы распознавания. М. : Высш. шк., 1989. 232 с.
6. Сирота А. А. Компьютерное моделирование и оценка эффективности сложных систем. М. : Техносфера, 2006. 280 с.
7. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов : пер. с англ. М. : Наука, 1979. 366 с.
8. Местецкий Л. М. Математические методы распознавания образов : курс лекций. – М. : МГУ, 2004. 85 с.
9. Городецкий В. И., Серебряков С. В. Методы и алгоритмы коллективного распознавания : обзор // Труды СПИИРАН. Вып. 3, т. 1. СПб. : Наука, 2006. С. 139–171.
10. Методы и средства идентификации источников радиоизлучения / Е. А. Башков, А. Г. Воронцов, Н. М. Гришко [и др.] ; под ред. А. А. Зори. Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2010. 345 с.
11. Мельников Ю. П. Воздушная радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности. – М. : Радиотехника, 2005. 304 с.
12. Колк А. А. Об алгоритмах распознавания типов радиоэлектронных средств в бортовых комплексах разведки // Вестник ЮУрГУ. Сер. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2013. Т. 13, № 2. С. 122–127.
13. Николаев И. М., Адаменко А. А., Закиров С. В., Асанов Э. Э. Статистический синтез алгоритма распознавания источников радиоизлучений по сигнальным признакам интервального типа // Радиотехника : всеукраинск. межведомств. техн. сб. / ХНУРЭ. 2001. Вып. 123. С. 122–124.
14. Перунов Ю. М., Мацукевич В. В., Васильев А. А. Зарубежные радиоэлектронные средства / под ред. Ю. М. Перунова : в 4 кн. Кн. 1. Радиолокационные системы. М. : Радиотехника, 2010. 336 с.
15. Бобков А. БРЭО тактического истребителя F-16 // Зарубежное военное обозрение. 2007. № 12. С. 50–57. URL: <http://pentagonus.ru/publ/18-1-0-546>.
16. Михов М. Прицельные РЛС самолётов тактической авиации стран НАТО // Зарубежное военное обозрение. 1990. № 8. С. 38–43. URL: <http://pentagonus.ru/publ/16-1-0-679>.
17. Авиационные радиостанции ВС США. Ч. 3. URL: [http://pentagonus.ru/publ/aviacionnye\\_radiostancii\\_vs\\_ssha\\_chast\\_3/18-1-0-2439](http://pentagonus.ru/publ/aviacionnye_radiostancii_vs_ssha_chast_3/18-1-0-2439).
18. Журавлёв Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. 1978. Вып. 33. С. 5–68.
19. Алексанян А. А., Журавлёв Ю. И. Об одном подходе к вопросу построения эффективных алгоритмов распознавания // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 1985. Т. 25. № 2. С. 283–291.

**Рецензент Б. О. Демідов**, д-р техн. наук, проф.  
(Харківський національний університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба)