

Критерії ефективності цифрових адаптивних систем дистанційного виявлення і розпізнавання небезпечних об'єктів

Володимир Орлов * ^{1 A}; Борис Дем'янчук ^{2 A}; Віктор Клименко ^{3 A};
Сергій Єгоров ^{4 B}; Олег Тарасов ^{5 B}; Лілія Семененко ^{6 C}

^A Військова академія, м. Одеса, Україна

^B Кафедра військової підготовки Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна

^C Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, м. Київ, Україна

Received: October 2, 2021 | Revised: October 18, 2021 | Accepted: October 30, 2021

DOI: 10.33445/sds.2021.11.5.12

Анотація

В статті приділяється особлива увага підвищенню вимог до безпеки об'єктів особливої важливості, державного кордону, водного і повітряного транспорту в умовах наростаючих високотехнологічних терористичних загроз. Досягнення цих вимог нерозривно пов'язано із забезпеченням якісних показників технічних засобів дистанційного спостереження за небезпечними об'єктами, ускладненням і інтелектуалізацією локаційних систем, мереж датчиків з функціями мережецентричної взаємодії. Застосування противником засобів радіоелектронної протидії, швидка зміна сценаріїв постановки комбінованих завад визначають тенденції, які спрямовані на підвищення вірогідності отримання інформації в локаційних системах, адаптації до завад різного походження на коротких тимчасових інтервалах. Відсутність вірогідної інформації про наявність об'єкта може привести до неприпустимих екологічних і матеріальних втрат, а помилкові тривоги – до невиправданих додаткових витрат. У зв'язку з цим, важливим напрямком є забезпечення максимально вірогідної інформації в умовах завад різного походження. Актуальність проблеми пов'язана з пошуком компромісу між витратами (вартість і час розроблення) на побудову адаптивних систем виявлення і розпізнавання, і з іншого боку, ефективністю (вірогідність моделювання, складність реалізації), що досягається в результаті розроблення критеріїв оптимізації. При цьому, особлива увага приділяється забезпеченню високих якісних показників виявлення і розпізнавання в умовах мінливої та апріорно невідомої завадової обстановки.

Розроблений підхід і критерії для синтезу та аналізу цифрових адаптивних систем виявлення та розпізнавання. Критерії створені на декомпозиції середнього ризику і ймовірностей помилок прийнятих рішень, обумовлених: кінцевим розміром системи, обсягом навчальної вибірки і розрядністю обчислень. Такий підхід дозволяє послідовно вирішувати завдання синтезу та аналізу оптимальних систем.

Ключові слова: адаптація, антенна решітка, навчальна вибірка, виявлення, розпізнавання, завада.

Постановка проблеми

В умовах наростаючих високотехно- особлива увага підвищенню вимог до гічних терористичних загроз приділяється безпеки об'єктів особливої важливості,

¹ * **Corresponding author:** доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3065-3884

² доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2862-9412

³ кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8073-4404

⁴ кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6774-056X

⁵ кандидат військових наук, e-mail: tarasovo@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6763-8653

⁶ здобувач наукового ступеня, e-mail: selin-ua@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5628-3586

державного кордону, водного і повітряного транспорту [1, 2]. Це нерозривно пов'язано із забезпеченням якісних показників технічних засобів дистанційного спостереження за небезпечними об'єктами, ускладненням і інтелектуалізацією локаційних систем, мереж датчиків з функціями мережецентричної взаємодії. Застосування противником засобів радіоелектронної протидії, швидка зміна сценаріїв постановки комбінованих завад визначають тенденції, спрямовані на підвищення вірогідності інформації в локаційних системах [3], адаптації до завад різного походження на коротких тимчасових інтервалах [4, 5]. Відсутність вірогідної інформації про наявність об'єкта може привести до неприпустимих екологічних і

матеріальних втрат, а помилкові тривоги – до невиправданих додаткових витрат. У зв'язку з цим, важливим напрямком є забезпечення максимально вірогідної інформації в умовах завад різного походження. Актуальність проблеми пов'язана з пошуком компромісу між витратами (вартість і час розроблення) на побудову адаптивних систем виявлення і розпізнавання (АСВ і АСР), і з іншого боку, ефективністю (вірогідність моделювання, складність реалізації), що досягається в результаті розроблення критеріїв оптимізації [3]. При цьому, особлива увага приділяється забезпеченню високих якісних показників виявлення і розпізнавання в умовах мінливої та апріорно невідомої завадової обстановки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розвиток терористичних загроз пов'язаний з використанням сучасного і перспективного зброї і протидії йому [6]. Значна роль в забезпеченні максимально вірогідної інформації при дистанційному спостереженні за об'єктами підвищеної небезпеки відводиться реєстрації різних фізичних процесів, зокрема, рішенням завдань виявлення і розпізнавання віддалених або важкодоступних об'єктів методами радіолокації, звуколокації, сейсмолокації і гідролокації.

В [7, 8] проводиться обґрунтування системи показників і критеріїв ефективності ППО особливо важливих об'єктів країни на підставі математичного очікування величини відносних втрат об'єктів, що захищаються, відносних величин загальних втрат бойового потенціалу військ, та імовірність збереження кожного об'єкта від ударів. Для досягнення розроблених показників необхідно тепер визначити вимоги до характеристик АСВ і АСР.

Імовірнісні критерії ефективності в радіолокації розглядаються для просторової обробки сигналів: адаптивних антенних решіток [9], для адаптивних багатопозиційних радіолокаційних систем [10]. На основі

імовірнісних характеристик адаптивних систем часової обробки сигналів проводиться аналіз втрат через кінцевий обсяг навчальної вибірки [11]. Імовірнісні критерії ефективності застосовуються для виявлення терористичних атак із застосуванням безпілотних літальних апаратів. Запропоновано підхід Байєса для виявлення і розпізнавання малих літальних апаратів неадаптивними системами [12], та основі нейронних мереж з використанням адаптивних систем [13]. Імовірнісні методи оцінки ефективності застосовуються для гідроакустичних засобів охорони морських рубежів [14], в сейсмолокації для виявлення і розпізнавання кроків порушника і класу рухомого транспорту [15].

У відомих літературних джерелах аналізу ефективності адаптації недостатньо досліджені ймовірнісні характеристики виявлення і розпізнавання в умовах адаптації, зокрема, при використанні адаптації антенних решіток і систем часової обробки. Це призводить до відсутності ймовірного контролю вірогідності прийнятих рішень, непередбачуваним ризикам при усуненні погроз від небезпечних об'єктів. При цьому, вірогідності помилок виявлення

визначаються на етапах розроблення і випробувань РЛС шляхом математичного і натурного моделювання, а потім

обчислюються ризики на основі досвіду збитків і аварій.

Постановка завдання

Існуючі методики складні, отримані статистичним або натурним моделюванням лише для обмеженої області параметрів. При комплексуванні багатоканальних систем виявлення і розпізнавання потрібен розвиток методик для аналітичного синтезу і аналізу АСВ і АСР, зменшення обсягу обчислювальних витрат, розрахунку порогових рівнів та визначення вірогідності рішень на межі зони

контролю.

Метою статті є розроблення критеріїв для синтезу, оптимізації та аналізу адаптивних цифрових систем виявлення і розпізнавання для обліку ймовірностей помилок, обумовлених: розміром системи, обсягом навчальної вибірки і розрядністю аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

Виклад основного матеріалу

На основі огляду особливостей різних існуючих систем локації пропонується проводити аналіз процесів на основі узагальненої моделі комп'ютеризованої системи локації (рис. 1), з урахуванням впливу завад, помилок обчислень і похибок оцінювання параметрів сигналів в АСВ і АСР. Тут застосовується розподілена мережа датчиків для прийому сигналів S від досліджуваних об'єктів в умовах заважаючих віддзеркалень і випромінювань X . Априорна невизначеність щодо параметрів сигналів S визначається особливостями об'єкта випромінювання.

Істотний вплив на якість виявлення і розпізнавання вносить середовище поширення, що спотворює форму сигналу $f(S)$, а також наявність зовнішніх завад X . Додаткові помилки виникають в блоці адаптивного цифрового оброблення сигналів (ЦОС) через кінцеву розрядність B даних і при адаптації через похибки оцінок параметрів моделей сигналів \hat{S} , коваріаційної матриці завад \hat{R} , еталонів класів станів об'єктів, отриманих по обмеженому обсягу K навчальної вибірки [4, 5]. Відсутність інформації про вплив цих факторів призводить до непередбачуваної зміни вірогідності рішень АСВ і АСР, яка визначається можливостями помилок. Операторні рішення здійснюється на основі

інформації, що надійшла з АСВ і АСР, в яких прийнято одне (i -е) з $0, \dots, M$ рішень про відсутність віддаленого об'єкта ($i = 0$) або про його наявність та віднесення до одного з класів ($i > 1$). Вірогідність прийнятих рішень контролюється оцінками можливостями помилок p_{ij} , які обчислюються на основі параметрів АСВ і АСР (порог виявлення, відношення сигнал/завада та ін.), що розробляються розрахунковим співвідношенням. За прийнятими рішеннями і відповідних їм можливостям помилок визначається рішення, з урахуванням плати Π_{ij} за помилки прийняття i -ого рішення при j -ом класі об'єкта, що доставляє мінімальний ризик оператора [3]

$$\Delta_i = \min_{i=1, \dots, M} \sum_{j=0}^M \Pi_{ij} p_{ij}. \quad (1)$$

Плати Π_{ij} за помилки можуть бути опосередковані у вигляді посадових інструкцій і статутних рекомендацій оператору, вироблених на основі економічного моніторингу за результатами аварій і збитків від невірних рішень, отриманих за період експлуатації аналогічних об'єктів.

Для оперативного оцінювання ризику важливо визначення вірогідності прийнятих рішень за прийнятими моделям ймовірнісних характеристик досліджуваних процесів. Відсутність інформації про вплив цих факторів призводять до непередбачуваної зміни

вірогідності рішень АСВ і АСР, яка визначається можливостями помилок [3]. Для контролю вірогідності прийнятих рішень і забезпечення заданої помилки

розпізнавання необхідно обчислення передбачуваних ймовірностей помилок P_{ij} та встановлення вимог до обсягу навчальної вибірки і розрядності АЦП вхідних даних.

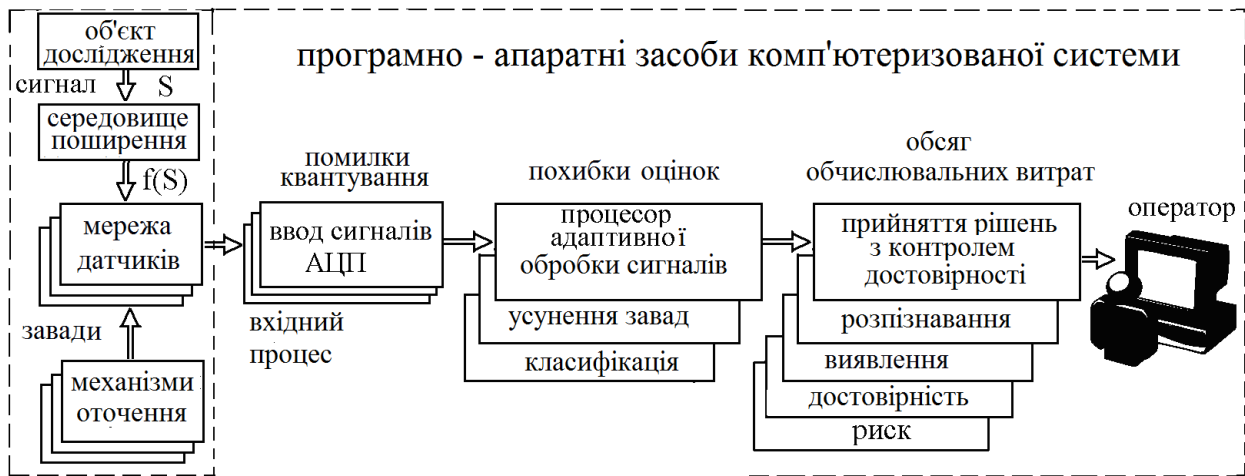


Рисунок 1 – Схема процесу оброблення інформації

Для вдосконалення критеріїв для обґрунтованого вибору параметрів АСВ і АСР проводиться аналіз існуючих рішень при параметричній невизначеності щодо моделей завад та сигналів. Формулювання завдання виявлення сигналу на фоні завад в термінах теорії перевірки статистичних гіпотез зводиться до пошуку правила вибору рішення по спостережуваним даними на користь однієї з гіпотез відсутності H_0 або наявності сигналу H_1 [4]. При цьому в якості робочих характеристик алгоритму виявлення (в залежності від вибору критерію оптимальності) можуть використовуватися залежності середнього ризику або ймовірностей помилок (помилкової тривоги і пропуску сигналу) з урахуванням вихідних параметрів сигналу і завад.

При наявності повної апріорної інформації про сигнал і завади застосовується Байєсове правило виявлення [3], що складається в розбитті n -мірного вибіркового простору вхідних вибірок Y на дві області (Y^0 і Y^1), що не перехрещуються та доставляють мінімум середнього ризику Δ . У відсутності інформації про апріорні ймовірності і матриці платежів набув широкого поширення статистичний синтез за критерієм Неймана-Пірсона [3, 4], що забезпечує (при фіксованій ймовірності

помилкової тривоги F) мінімум ймовірності β пропуску сигналу або максимум ймовірності правильного виявлення D

$$F = \int_{Y^1} \omega(Y, H_0) dY;$$

$$\beta = 1 - D = \int_{Y^0} \omega(Y, H_1) dY. \quad (2)$$

де $\omega(Y, H_i)$ – умовна щільність ймовірності (функція правдоподібності) вибірки Y в припущенні, що вірна гіпотеза H_i .

Застосування критеріїв (1), (2) вимагає наявності апріорних даних, що дозволяють побудувати функції правдоподібності $\omega(Y, H_0)$ і $\omega(Y, H_1)$, а алгоритм виявлення зводиться до порівняння з порогом C відносини правдоподібності [3]

$$d(Y) = \omega(Y, H_1) / \omega(Y, H_0) > c, \quad (3)$$

причому значення порога визначається відповідно до обраного критерію оптимальності.

Для моделі нормально розподілених завад, які подаються N відліками вибірки X з довільною формою спектра і коваріаціоної матриці R_n , щільність розподілу ймовірностей (ЩРЙ) має вигляд

$$a)^{-Na/2} |R_{\Pi}|^{-a/2} \exp\{-0.5a(Y - S)^T R_{\Pi}^{-1}(Y - S)\}, \quad (4)$$

де $Y = X + S$ – вектор розміру N вибірки вхідного процесу, що містить адитивну суміш завади і сигналу;

a – параметр представлення процесів у формі дійсних ($a = 1$) або комплексних ($a = 2$) векторів;

T – знак транспонування і комплексного сполучення (якщо сигнали і завади представлені в комплексній формі).

Достатня статистика для повністю відомого сигналу S подана в вигляді логарифма відношення правдоподібності [4] і з точністю до постійного множника визначається виразом

$$d(Y) = \ln[\omega(Y|S)/\omega(Y|S_0 = 0)] = 0.5Y^T R_{\Pi}^{-1}S + 0.5S^T R_{\Pi}^{-1}Y - 0.5S^T R_{\Pi}^{-1}S = \operatorname{Re}\{S^T R_{\Pi}^{-1}Y\} - 0.5S^T R_{\Pi}^{-1}S. \quad (5)$$

Статистику $z = S^T R_{\Pi}^{-1}Y$ можна формувати за допомогою трансверсального фільтра [4], ваговий вектор W якого має вигляд

$$W = R_{\Pi}^{-1}S, \quad z = S^T R_{\Pi}^{-1}Y = W^T Y, \quad (6)$$

і є оптимальним, з точністю до постійного множника λ , також з енергетичного критерію максимізації відносини сигнал/завада.

У задачах усунення параметричної невизначеності реальної заводової обстановки набув широкого поширення адаптивний Байєса підхід [3], заснований на заміні невідомих параметрів їх максимально правдоподібними вибірковими оцінками. У разі завод, що підкоряються нормальному закону розподілу ймовірностей, досить оцінити параметри коваріаційної матриці. Операція оцінювання коваріаційної матриці \hat{R} і її обернення є однією зі складових формування вирішальних статистик (1.5) – (1.9) і реалізується за допомогою ітеративних або прямих методів [4]. Перевагою ітеративних методів адаптації на основі замкнутого контуру зі зворотним зв'язком є простота реалізації. Вони реалізуються програмно на нейронних мережах для поточного моменту часу t у вигляді залежності $\hat{W}_t = \hat{W}_{t-1} +$

$\Delta W\{X_{t-1}, d(X)_{t-1} - d_0\}$, де ΔW – вектор неузгодженості, що залежить від вхідної вибірки X завади, різниці $d(X)_{t-1}$ між вихідним процесом і бажаним відгуком d_0 [4]. Вони володіють недоліками ітеративних алгоритмів градієнтного типу: повільної сходимістю до оптимальних рішень, а також залежністю ефективності від спектрально-кореляційних характеристик завод [4]. Ці недоліки відсутні у прямих методах адаптації ваг W (1.8), які вимагають підвищеної обчислювальної потужності, так як використовують безпосереднє оцінювання та звернення максимально правдоподібної вибіркової матриці загального вигляду [4, 5]

$$\hat{R}_{\Pi} = K^{-1} \sum_{i=1}^K X_i X_i^T,$$

$$\hat{W} = \hat{R}_{\Pi}^{-1}S/S^T \hat{R}_{\Pi}^{-1}S, \quad (7)$$

отриманої за K незалежними векторами вибірки завади.

Наслідком істотної апріорної невизначеності при проведенні синтезу і оптимізації систем без прив'язки до конкретного об'єкта є відсутність інформації про можливість настання подій і вартості помилок прийняття рішень. Має місце критеріальна невизначеність, яка полягає в тому, що не вдається висловити ефективність одним показником, наприклад, середнім ризиком [3]. У зв'язку з цим, на основі декомпозиції середнього ризику розробляються критерії ефективності, необхідні для синтезу, оптимізації та аналізу систем.

При повністю відомих параметрах сигнально-заводової обстановки може бути синтез оптимальної системи, для якої досягається потенційна ефективність (у відсутності помилок адаптації і квантування). При цьому потенційно досяжна ймовірність помилки $p_{ij}(N, M)$ залежить від: M – кількості перевірених гіпотез (що визначають багатоканальну структуру системи) і розміру системи N (число датчиків при просторової обробці або розмір фільтра при тимчасовій обробці), сукупність яких визначає також обсяг обчислювальних витрат $f(N, M)$ або складність цифрової системи.

При цьому можуть зростати ймовірності помилок $p_{ij}(N, M, K)$ адаптивної системи при зміні K і $p_{ij}(N, M, K, B)$ цифрової адаптивної системи (при зміні B і фіксованих N, M), а також вартість обчислювальних ресурсів.

У зв'язку з цим, пропонується проводити оптимізацію адаптивних систем виявлення і розпізнавання за критерієм середнього ризику при обмеженому обсязі обчислювальних витрат $f(N, M)$ на основі вибору оптимальних параметрів N, K, B системи для мінімізації ризику

$$\Delta = \min_{N, K, B} \sum_{i=0}^M \Delta_i, \quad \text{при } f(N, M) = \text{const}, \quad (8)$$

де $\Delta_i = \sum_{j=0}^M \Pi_{ij} p_{ij}$ – ризик i -ого рішення;

$f(N, M) = a_{\times} N_{\times} + a_{+} N_{+} + a_{\text{ФП}} N_{\text{ФП}} + a_{\text{ОЗУ}} N_{\text{ОЗУ}} + a_{\text{АЦП}} N_{\text{АЦП}}$ – обсяг обчислювальних витрат, що включає число операцій множення N_{\times} , складання N_{+} , функціональних перетворювачів $N_{\text{ФП}}$ і розмір пам'яті $N_{\text{ОЗУ}}$, АЦП $N_{\text{АЦП}}$ вагами $a_{\times}, a_{+}, a_{\text{ФП}}, a_{\text{ОЗУ}}, a_{\text{АЦП}}$, що визначають вартість апаратної реалізації або швидкодії при програмній реалізації.

Так як при синтезі систем не завжди відомі плати за помилки, то запропонований підхід полягає в декомпозиції ризику шляхом мінімізації кожної з ймовірностей помилок. Тоді синтез і оптимізація систем проводиться для всіх ймовірностей помилок p_{ij} , кожна з яких представлена сумою парціальних збільшень ймовірності

$$p_{ij} = \min_{N, K, B} p_{ij}(N, M) + \delta p_{ij}(N, M, K) + \delta p_{i,j}(N, M, K, B), \quad i, j = 0, \dots, M \quad (9)$$

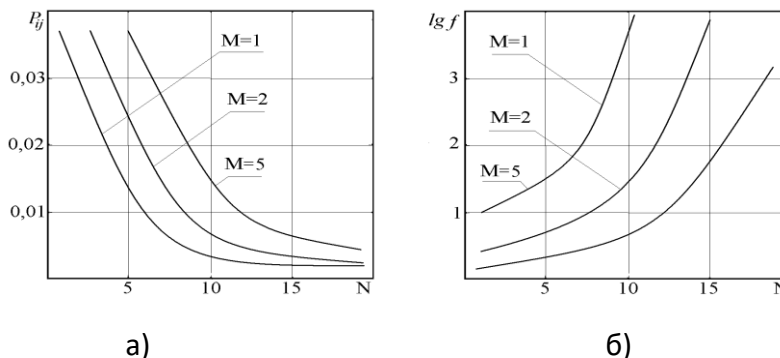


Рисунок 2 – Залежності від розміру системи з урахуванням:

а) ймовірності помилки виявлення; б) росту обсягу обчислювальних витрат

де $p_{ij}(N, M)$ – потенційна ймовірність помилки оптимальної системи заданої складності N, M , досяжна в разі відомих параметрів сигнально-завадової обстановки, при відсутності адаптації та апаратних помилок цифрових систем;

$$\delta p_{ij}(N, M, K) = p_{ij}(N, M, K) - p_{ij}(N, M) \quad (10)$$

- приріст ймовірності помилки, обумовлений процесами адаптації за навчальною вибіркою обсягу K ;

$$\delta p_{i,j}(N, M, K, B) = p_{i,j}(N, M, K, B) - p_{i,j}(N, M, K) \quad (11)$$

- приріст ймовірності помилки, обумовлений обмеженою розрядністю B цифрової системи.

На рис. 2 представлені залежності ймовірностей помилки виявлення $p_{ij}(N, M)$ і росту обсягу обчислювальних витрат $f(N, M)$ для системи багатоканального виявлення. Система заснована на лінійній оптимальній обробці сигналу $S^T = (1, -1, 1, -1, \dots)$ в каналах (7) при відомих параметрах завадової обстановки (завада з Гаусовою формою кореляційної функції з відношенням потужностей завада/шум 30 дБ).

У відсутності інформації про параметри сигнально-завадової обстановки проводиться адаптація системи на кінцевому інтервалі K шляхом оцінювання невідомих параметрів, що призводить до збільшення ймовірності помилки до величини $p_{ij}(N, M, K)$. При цифровій реалізації адаптивної системи виникають додаткові похибки і зростання вірогідності помилок до $p_{ij}(N, M, K, B)$ пов'язане з кінцевою розрядністю обчислювальних засобів.

На рис. 3 представлені залежності ймовірностей помилки відповідно з урахуванням адаптації K і розрядності B адаптивних систем, що застосовуються при оцінюванні параметрів завад, де δp_{ij} – парціальний приріст ймовірності по параметру K або B , що визначають похибки,

відповідно, оцінювання або квантування. З аналізу залежностей, представлених на рис.2 випливає, що збільшення складності системи N , M призводить до зменшення потенційно досяжної ймовірності помилки $p_{ij}(N, M)$ оптимальної системи.

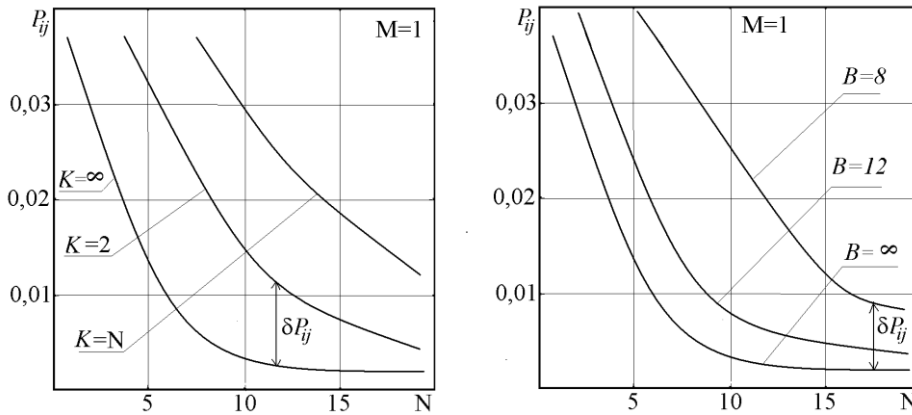


Рисунок 3 – Залежності ймовірності помилки виявлення від розміру системи з урахуванням:
а) адаптації; б) розрядності

Таким чином, запропонований в роботі підхід, критерій оптимізації (8) і показники вірогідності (9)-(11) у вигляді ймовірностей помилок, дозволяють визначити прийнятні значення збільшень ймовірностей вибором обсягу навчальної вибірки і розрядності. Методика оптимізації полягає в послідовному визначенні параметрів (спочатку K , потім B при заданій складності систем N , які забезпечують допустимі межі вірогідності прийнятих рішень (прийнятні збільшення вірогідності помилок). При цьому синтез і аналіз систем проводиться в порядку ускладнення завдань: $M = 1$ (бінарне виявлення), розпізнавання $M \geq 2$ класів і спільне виявлення – розпізнавання. Для кожного завдання пропонується досліджувати системи в порядку підвищення апріорної невизначеності щодо параметрів сигналів і завад. При цьому необхідно встановити вимоги до параметрів адаптивних систем виявлення і розпізнавання, провести класифікацію вимірювань сигналів і завад,

створити розрахункові співвідношення для контролю вірогідності прийнятих рішень.

Сутність методу синтезу системи спільного виявлення і розпізнавання сигналів полягає в оптимізації за сукупністю імовірнісних показників якості шляхом введення обмежень на окремі показники. Встановлюються умови для застосування помилок першого або другого роду до багатоканальних систем спільного виявлення і розпізнавання сигналів.

Нехай на дискретному інтервалі часу за вибіркою розміру N спостерігається процес $Y = X + \sum_{m=1}^M \lambda_m S_m$, де S_m – вектори можливих сигналів, X – вектор завад, випадкові величини $\lambda_m = \{0,1\}$ з $\Lambda^T = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$ – вектора індикаторів наявності одного з можливих незалежних несумісних сигналів (один з яких може бути дорівнює одиниці, а решта нулю). Потрібно визначити алгоритм $d(Y)$ формування вирішальною статистики відповідно до критерію середнього ризику [3]

$$\Delta = \min_d \Delta(d) = \Delta^e(d) + \Delta^p(d) = \sum_{m=1}^M \Delta_m^e + \sum_{m=1}^M \Delta_m^p, \quad (12)$$

де Δ^e, Δ^p – умовні ризики прийняття рішень виявлення і розпізнавання сигналу. Вони пов'язані з ймовірністю помилок виразами

$$\Delta_m^e = \Delta_m^{PT} + \Delta_m^{PC} = \Pi_m^{PT} F_m + \Pi_{m,i}^{PT} F_{m,i} + \Pi_m^{PC} (1 - D_m), \quad \Delta_m^p = \sum_{i \neq m}^M \Pi_{m,i} p_{m,i}^p, \quad (13)$$

де $F_{m,i} = p(d_m > c | Y = S_i + X)$ – ймовірність помилкової тривоги (ПТ) в m -ом каналі (рішення про виявлення в m -ом каналі сигналу при наявності суміші i -ого сигналу і завади X);

$F_{m,0} = p(d_m > c | Y = X)$ – ймовірність ПТ у m -ом каналі (рішення про виявлення m -ого сигналу при наявності тільки завади X);

$1 - D_m$ – ймовірність пропуску m -ого сигналу (ПС) виявлювача;

$D_m = p(d_m > c | Y = X + S_m)$ – ймовірність правильного виявлення m -ого сигналу;

$p_{m,i}^p$ – ймовірність помилки розпізнавання при прийнятті рішення про m -ий сигнал при

наявності i -ого сигналу ($i \neq m$);

$\Pi_m^{PT}, \Pi_m^{PC}, \Pi_{m,i}$ – плати, відповідно, за помилкову тривогу, пропуск сигналу і помилку розпізнавання.

Вважаючи, що статистичний опис спостережуваних даних Y і параметрів Λ є повним, тобто відомі щільності розподілу $\omega(Y, S_1), \dots, \omega(Y, S_m), \omega(X)$ і апріорні ймовірності наявності сигналів $p_m = p(S_m), m = 1 \dots M$, завдання зводиться до байесового ризику, що дозволяє перейти до апостеріорних ризиків $\Delta^p(Y)$ і $\Delta^e(Y)$ через апостеріорні ймовірності $p(S_m | Y)$ наявності m -ого сигналу в вибірці Y

$$\Delta_m^e(Y) = \Pi_m^{PT} p_0(S_m | Y) + \Pi_m^{PC} p_{Si}(0 | Y), \quad \Delta_m^p = \sum_{i \neq m}^M \Pi_{m,i} p_{Sm}(S_i | Y), \quad (14)$$

де $p_0(S_i | Y) = p(S_i) \cdot p(X | S_i) / p(Y = X) = p(S_i) \cdot p(X | 0)$ – апостеріорна ймовірність наявності i -ого сигналу, коли присутня тільки завада;

$p_{Si}(0 | Y) = p(0) \cdot p(Y | S_i) / p_S(Y) = p(0) p(Y | S_i) / \sum_{m=1}^M p(S_m) p(Y | S_m)$ – апостеріорна ймовірність відсутності i -ого сигналу, коли він присутній;

$p_{Si}(S_j | Y) = p(S_j) p(Y | S_i) / \sum_{m=1}^M p(S_m) p(Y | S_m)$ – апостеріорна ймовірність наявності j -ого сигналу коли присутній i -ий сигнал;

$p(Y | S_i)$ – функція правдоподібності сигналу S_i за вибіркою Y ;

$p(S_i)$ – апріорні ймовірності наявності сигналів;

$p_S(Y)$ – ймовірності вибірки при наявності будь-якого сигналу;

$p(Y, S_i), p(Y | 0)$ – щільності розподілу вектора Y з параметрами векторів середніх відповідно сигналу S_i і завод $S_0 = 0$.

Пропонується метод знаходження правила $d(Y)$ багатоальтернативного розпізнавання при обмеженні на фіксований ризик виявлення у вигляді плати за помилку про наявність будь-якого сигналу (помилкової тривоги).

$$\min_d \Delta^p \{d(Y)\} \text{ при } \Delta^{PT} \{d(Y)\} = const. \quad (15)$$

Багатоальтернативне вирішальне правило будується на основі операцій порівняння відносин правдоподібності $d_{i,j}(Y) i, j = 1, \dots, M$ з граничними рівнями $v_{i,j}$ розпізнавання або c_i виявлення. Найбільш правдоподібним визнається клас, для якого все відношення правдоподібності

$$d_{ij}(Y) = p(Y | S_i) / p(Y | S_j) \quad (16)$$

підкоряються системі нерівностей:

$$\begin{cases} d_{ij}(Y) = p(Y | S_i) / p(Y | S_j) > v_{ij} & i, j = \overline{1, M} & i \neq j \\ d_i(Y) = p(Y | S_i) / p(Y | 0) > c_i & i = \overline{1, M}, \end{cases} \quad (17)$$

де $v_{ij} = \Pi_{ij} p_i/p_j$, $c_i = (p_0/p_i)(\Pi_i^{ПТ}/\Pi_i^{ПС})$ – порогові рівні, які визначаються сукупністю апіорних ймовірностей і плат за помилки. З верхньої групи рівнянь (17) $d_{ij} > v_{ij}$ виноситься рішення про наявність i -ого класу, якщо для всіх $i \neq j$ виконується перевищення порога, а рішення про виявлення сигналу приймається з нижньої групі рівнянь $d_i > c_i$.

Правило прийняття рішення згідно з умовами (17) має один суттєвий недолік. Можливі ситуації, коли ця система нерівностей може бути несумісною і по вибірці, взагалі не може бути прийнято

$$z(d_1, \dots, d_M, Y) = \begin{cases} i = \max_{m \in 1, M} d_m(Y), & d_i(Y) > c_i \\ 0, & d_i(Y) < c_i, \quad m \in 1, M \end{cases} \quad (18)$$

згідно з яким вибір максимуму здійснюється за $M - 1$ порівнянь, а потім вибране відношення правдоподібності порівнюється з порогом. При невідомих параметрах R_{Π}, S_i , застосовується адаптивний підхід Байеса [3] шляхом підстановки оцінок \hat{R}_{Π}, \hat{S}_i у відношення правдоподібності.

Представляють інтерес реалізації вирішальних статистик d_i , що застосовуються в (18) для типових моделей відомих і випадкових сигналів. У разі повністю відомих параметрів сигнально-завадової обстановки сигнали представляються векторами середніх S_i розміру N , прийнятими в однакових завадових умовах, що визначаються коваріаційною матрицею R_{Π} нормально розподілених завад. Тоді для ЩРЙ $\omega(Y|S_i) = (2\pi)^{-N} |R_{\Pi}|^{-1} \exp\{-0.5(Y - S_i)^T R_{\Pi}^{-1} (Y - S_i)\}$ ансамблю сигналів достатні статистики логарифма відношення правдоподібності мають вигляд

$$d_m(Y) = \ln |\omega(Y|S_m)/\omega(Y|S_0)| = 0.5Y^T R_{\Pi}^{-1} S_m + 0.5S_m^T R_{\Pi}^{-1} Y - 0.5S_m^T R_{\Pi}^{-1} S_m = \text{Re}\{S_m^T R_{\Pi}^{-1} Y\} - 0.5S_m^T R_{\Pi}^{-1} S_m. \quad (19)$$

Моделі випадкових сигналів, подаються у

ніякого рішення, тобто розбиття простору вибірок розділяючими поверхнями може не охоплювати певні області вибірок. Єдиною можливістю усунення цього недоліку є установка однакових порогів для рівнянь першої групи (17) $v_{ij}=1$, що рівносильне прийняттю однаковими апіорних ймовірностей появи сигналів $p(S_i) = \text{const}$ і призначенням рівними плат за помилки $\Pi_{ij}=1$. Тоді для нормально розподілених процесів здійснюється перехід від відносин правдоподібності до приватних вирішальних статистик d_i , а правило прийняття рішень $z(d_1, \dots, d_M, Y)$ має вид

вигляді випадкових процесів з нульовим середнім $S_i=0$, коваріаційними матрицями

$\overline{S_i S_i^T} = R_i$ і описуються щільністю

$$\omega(Y|S_m) = (2\pi)^{-N} |R_{\Pi} + R_m|^{-1} \exp\{-0.5Y^T (R_{\Pi} + R_m)^{-1} Y\}, \quad (20)$$

достатні статистики мають вигляд

$$d_m(Y) = Y^T R_{\Pi}^{-1} Y - Y^T (R_{\Pi} + R_m)^{-1} Y = Y^T [R_{\Pi}^{-1} - (R_{\Pi} + R_m)^{-1}] Y \quad (21)$$

і є квадратичними функціями від вхідного процесу.

В умовах апіорної невизначеності щодо параметрів R_{Π}, S сигнально-завадової обстановки проводиться адаптація шляхом підстановки максимально правдоподібних оцінок коваріаційної матриці завад і вектора сигналу по K векторах навчальної вибірки (7).

Відповідно до (18)-(21) побудована структурна схема на рис. 4, на якій достатні статистики $d_i(Y)$, які перевищили пороги c_i в пристроях управління порогом (ПУ), проходять через ключі K і номер максимальної з них є прийнятим рішенням.

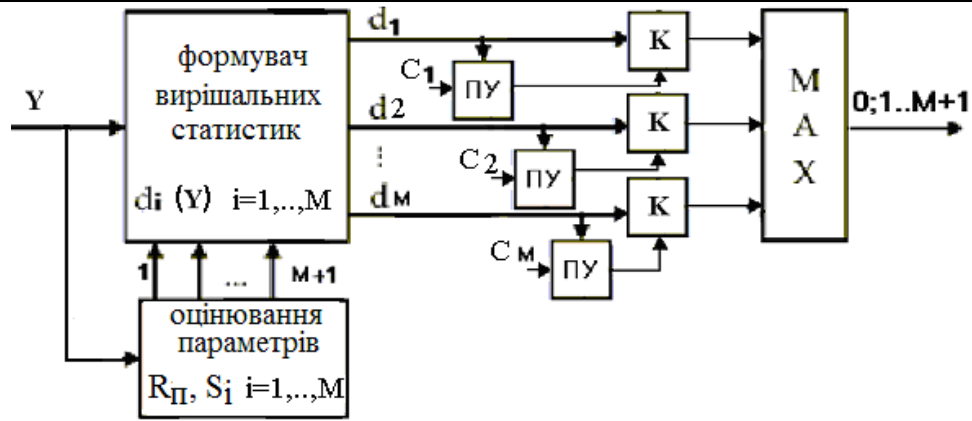


Рисунок 4 – Адаптивна система спільного виявлення і розпізнавання сигналів

Визначення аналітичних виразів для ймовірностей помилок виявлення засноване на виборі таких відомих моделей вхідних процесів і оцінок їх параметрів, які дозволяють провести математичні операції усереднення ймовірностей правильного виявлення і помилкової тривоги по плотностям розподілу оцінок. Запропонована методика аналізу багатоканальної системи спільного виявлення і розпізнавання

дозволяє в загальному вигляді розрахувати ймовірності помилок для довільних вирішальних статистик і моделей сигналів. Це створює передумови для системного аналізу помилок в порядку ускладнення систем, а також для контролю вірогідності та визначення ризику остаточного рішення, прийнятого оператором в послідовності, наведеній на рис. 5.

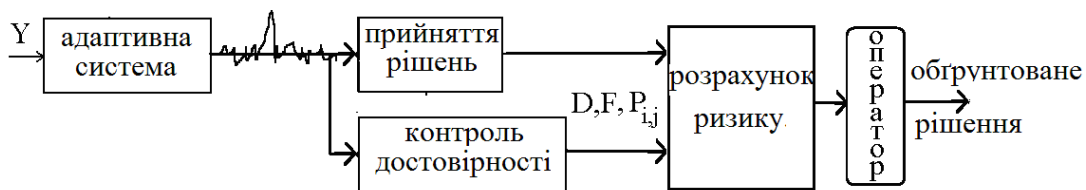


Рисунок 5 – Адаптивна система з контролем помилок виявлення і розпізнавання

Висновки

1. Розроблено критерії для синтезу, оптимізації та аналізу цифрових систем адаптивного виявлення і розпізнавання. Критерії засновані на декомпозиції середнього ризику і ймовірностей помилок прийнятих рішень для обліку збільшень ймовірностей помилок, обумовлених: кінцевим розміром системи, обсягом навчальної вибірки і розрядністю обчислень. Такий підхід дозволяє послідовно вирішувати завдання синтезу, оптимізації та аналізу для оптимальних систем, потім для адаптивних

цифрових систем з урахуванням розрядності і обсягу обчислювальних витрат.

2. Розроблено методику синтезу адаптивних систем спільного виявлення і розпізнавання на основі мінімізації середнього ризику при фіксованій ймовірності помилки першого роду. Отримане правило зводиться до порівняння з пороговим рівнем максимального з функціоналів відношення правдоподібності з урахуванням обмежень, що накладаються на плати за помилки.

Список використаних джерел

1. Identification of Potential Terrorists and Adversary Planning. Emerging Technologies

and New Counter-Terror Strategies / Editors Gordon, T.J., Florescu, E., Glenn, J.C., Sharan, Y.

- Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop*. Washington. 2017. 196 p.
2. Оценка кризисных ситуаций и террористических угроз национальной безопасности: монография: в 2 кн. / под ред. В. Л. Шульца. Кн. 2. Москва : Наука, 2012. 139 с.
 3. Репин В. Г., Тартаковский Г.П . Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. Москва: Сов.радио, 1977. – 432 с.
 4. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / Под редакцией Я.Д.Ширмана. Москва: Радиотехника, 2007. 512 с.
 5. Фомин Я. А., Тарловский Г. Р. Статистическая теория распознавания образов. Москва: Радио и связь, 1986. 264 с.
 6. Зайцев А. И. Терроризм – война будущего. Техничко-технологические проблемы сервиса. №1(43). 2018. С. 126-133.
 7. Загорка О. М. До питання обґрунтування показників і критеріїв ефективності протиповітряної оборони / О. М. Загорка, В. В. Коваль, О. М. Жарик // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 2. – С. 35-40. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2013_2_8.
 8. Жарик А. Н. Выбор единых показателей и критериев эффективности функционирования систем ПВО важных государственных объектов / А.Н. Жарик // Системы озброєння і військова техніка. – 2011. – №2 (26), – С. 199-204.
 9. Шинкарук О. Н., Ленков Е. С., Семибаламут К. М. Эффективность обнаружителя на основе алгоритма Кейпона при многоканальном приёме сигналов большой длительности. Вісник Хмельницького національного університету. №5, 2011. С. 217-221.
 10. Ксендзук А. В., Козлов К. О. Адаптивный коррелятор в неизлучающей радиолокационной системе // Вопросы радиоэлектроники. 2019. № 3. С. 41–45. DOI: 10.21778/2218-5453-2019-3-41-45.
 11. Попов Д. И. Адаптивное обнаружение групповых многочастотных сигналов. Вісник НТТУ КПІ Серія – Радіотехніка Радіоапаратуробудування, 2018, Вып. 74, С. 44–50.
 12. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C. K., Ozdemir O. and Guvenc I. Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques, 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019, pp. 1-13, DOI: 10.1109/AERO.2019.8741970.
 13. Catalin Dumitrescu, Marius Minea, Ilona Madalina Costea, Ionut Cosmin Chiva, Augustin Semenescu. Development of an Acoustic System for UAV Detection. Journal Sensors 2020, Sep; 20(17): 4870; Pp. 1-27. DOI: 10.3390/s20174870.
 14. Пятакович В. А. Методология оценки эффективности радиогидроакустических средств в структуре нейро-экспертной системы мониторинга морских акваторий государства // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/24TVN517.pdf>
 15. Koce G., Yegin K. Footstep and Vehicle Detection Using Slow and Quick Adaptive Thresholds Algorithm. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013. 9 pages. DOI: 10.1155/2013/783604.

Критерии эффективности цифровых адаптивных систем дистанционного обнаружения и распознавания опасных объектов

**Владимир Орлов ^{* 1 А}; Борис Демянчук ^{2 А}; Виктор Клименко ^{3 А};
Сергей Егоров ^{4 В}; Олег Тарасов ^{5 В}; Лилия Семененко ^{6 С}**

* Corresponding author: ¹ доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3065-3884

² доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2862-9412

³ кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8073-4404

⁴ кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6774-056X

⁵ кандидат военных наук, e-mail: tarasovo@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6763-8653

⁶ соискатель ученой степени, e-mail: selin-ua@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5628-3586

^A Военная академия, г. Одесса, Украина

^B Кафедра военной подготовки Национального авиационного университета, Киев, Украина

^C Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

Аннотация

В статье уделяется особенное внимание повышению требований к безопасности объектов особой важности, государственной границы, водного и воздушного транспорта в условиях нарастающих высокотехнологичных террористических угроз. Достижение этих требований неразрывно связано с обеспечением качественных показателей технических средств дистанционного наблюдения за опасными объектами, усложнением и интеллектуализацией локационных систем, сетей датчиков с функциями мережецентричной взаимодействия. Применение противником средств радиоэлектронного противодействия, быстрое изменение сценариев постановки комбинированных помех определяют тенденции, которые направлены на повышение достоверности получения информации в локационных системах, адаптации к помехам разного происхождения на коротких временных интервалах. Отсутствие достоверной информации о наличии объекта может привести к недопустимым экологическим и материальным потерям, а ошибочные тревоги – к неоправданным дополнительным расходам. При этом, особенное внимание уделяется обеспечению высоких качественных показателей выявления и распознавания в условиях переменчивой и априорно неизвестной помеховой обстановки.

Разработанный подход и критерии для синтеза и анализа цифровых адаптивных систем выявления и распознавания. Критерий основан на декомпозиции среднего риска и вероятностей ошибок принятых решений, обусловленных: конечным размером системы, объемом учебной выборки и разрядностью вычислений. Такой подход позволяет последовательно решать задание синтезу и анализу оптимальных систем.

Ключевые слова: адаптация, антенная решетка, обучающая выборка, выявление, распознавание, помеха.

Efficiency criteria for digital adaptive systems for remote detection and recognition of dangerous objects

Volodymyr Orlov ^{* 1 A}; **Boris Demianchuk** ^{2 A}; **Victor Klimenko** ^{3 A};
Yehorov Serhii ^{4 B}; **Oleh Tarasov** ^{5 B}; **Liliia Semenko** ^{6 C}

*** Corresponding author:** ¹ Doctor of Technical Sciences, assistant professor, Leading Researcher, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3065-3884

² Doctor of Technical Sciences, professor, Head of Department, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2862-9412

³ Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Associate Professor of Department, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8073-4404

⁴ Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, e-mail: aosemenenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6774-056X

⁵ Candidate of Military Sciences, e-mail: tarasovo@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6763-8653

⁶ PhD student, e-mail: selin-ua@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5628-3586

^A Military Academy, Odesa, Ukraine

^B Department of Military Training of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine

^C National University of Defense of Ukraine named after Ivan Cherniakhovskiy, Kyiv, Ukraine

Abstract

The article pays special attention to increasing the requirements for the security of objects of special importance, the state border, water and air transport in the face of growing high-tech

terrorist threats. The achievement of these requirements is inextricably linked with the provision of quality indicators of technical means of remote monitoring of dangerous objects, the complexity and intellectualization of location systems, sensor networks with the functions of network-centric interaction. The use of electronic countermeasures by the enemy, the rapid change of scenarios of combined interference determine trends that are aimed at increasing the probability of obtaining information in location systems, adaptation to interference of various origins at short intervals. Lack of reliable information about the presence of the object can lead to unacceptable environmental and material losses, and false alarms – to unjustified additional costs. In this regard, an important area is to provide the most reliable information in the face of interference of various origins. The urgency of the problem is related to the search for a compromise between costs (cost and time of development) to build adaptive detection and recognition systems, and on the other hand, efficiency (simulation probability, implementation complexity), which is achieved by developing optimization criteria. At the same time, special attention is paid to ensuring high quality indicators of detection and recognition in the conditions of changing and a priori unknown noise situation.

An approach and criteria for the synthesis and analysis of digital adaptive detection and recognition systems have been developed. The criteria are based on the decomposition of the average risk and the probability of errors in the decisions made, due to: the final size of the system, the size of the training sample and the bit count. This approach allows you to consistently solve the problem of synthesis and analysis of optimal systems.

Keywords: adaptation, antenna array, training sample, detection, recognition, interference.

References

1. Identification of Potential Terrorists and Adversary Planning. Emerging Technologies and New Counter-Terror Strategies / Editors Gordon, T. J., Florescu, E., Glenn, J. C., Sharan, Y. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop. Washington : 2017. 196 p.
2. Shults V. L. (Ed.) (2012). Otsenka krizisnykh situatsiy i terroristicheskikh ugroz natsionalnoy bezopasnosti: monografiya: v 2 kn., Kn. 2. Moscow, Russia : Nauka. 139 s. [In Russian].
3. Repin V. G., Tartakovskiy G. P. (1977). Statisticheskii sintez pri apriornoy neopredelennosti i adaptatsiya informatsionnykh sistem. Moscow, Russia : Sov.radio 432 s. [In Russian].
4. Shirman Ya. D. (Ed.) (2007). Radioelektronnyie sistemy. Osnovy postroeniya i teoriya. Moscow, Russia : Radiotekhnika, 512 s. [In Russian].
5. Fomin Ya. A., Tarlovskiy G. R. (1986). Statisticheskaya teoriya raspoznavaniya obrazov. Moscow, Russia: Radio i svyaz. 264 s. [In Russian].
6. Zaytsev A. I. (2018). Terrorizm – voyna buduschego. Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa №1(43) S. 126-133. [In Russian].
7. Zagorka O. M., Koval V. V., Zharik O. M. (2013). Do pitannya obgruntuvannya pokaznikiv i kriteriyiv effektivnosti protipovitryanoyi oboroni // Nauka i tehnika Povitryanih Sil Zbroynih Sil Ukrayini. № 2. S. 35-40. Available from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nitps_2013_2_8. [In Ukrainian].
8. Zharik A. N. (2011). Vybor edinykh pokazateley i kriteriev effektivnosti funktsionirovaniya sistem PVO vazhnykh gosudarstvennykh ob'ektov. *Sistemi ozbroennya i viyskova tehnika*. №2 (26), S. 199–204. [In Russian].
9. Shinkaruk O. N., Lenkov E. S., Semibalamut K. M. (2011). Effektivnost obnaruzhitelya na osnove algoritma Keypona pri mnogokanalnom priyome signalov bolshoy dlitelnosti. Visnik Hmel'nitskogo natsionalnogo universitetu. №5. S. 217–221. [In Russian].
10. Ksendzuk A. V., Kozlov K. O. (2019). Adaptivnyy korrelyator v neizluchayushey radiolokatsionnoy sisteme // Voprosy radioelektroniki. № 3. S. 41–45. DOI:

- 10.21778/2218-5453-2019-3-41-45. [In Russian].
11. Popov D. I. (2018). Adaptivnoe obnaruzhenie gruppovyih mnogochastotnyih signalov. *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia*, № 74, S. 44–50. [In Russian].
12. Ezuma M., Erden F., Anjinappa C. K., (et al.). (2019). Micro-UAV Detection and Classification from RF Fingerprints Using Machine Learning Techniques, 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019, pp. 1-13, DOI: 10.1109/AERO.2019.8741970.
13. Catalin Dumitrescu, Marius Minea, Ilona Madalina Costea, Ionut Cosmin Chiva, Augustin Semenescu (2020). Development of an Acoustic System for UAV Detection. *Journal Sensors*, Sep; 20(17): 4870; Pp. 1-27. DOI: 10.3390/s20174870.
14. Pyatakovich V. A. (2017). Metodologiya otsenki effektivnosti radiogidroakusticheskikh sredstv v strukture neyro-ekspertnoy sistemyi monitoringa morskikh akvatoriy gosudarstva. *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*. Vol 9, №5. Available from: <https://naukovedenie.ru/PDF/24TVN517.pdf>
15. Koce G., Yegin K. Footstep and Vehicle Detection Using Slow and Quick Adaptive Thresholds Algorithm. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2013. 9 pages. URL: 10.1155/2013/783604.