

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ
ВТОРИННИМИ РАДІОЛОКАЦІЙНИМИ СИСТЕМАМИ**

Вступ

Суттєву роль в інформаційному забезпеченні системи контролю повітряного простору та управління повітряного руху відіграють вторинні радіолокаційні системи спостереження повітряного простору, до яких відносять вторинні радіолокатори [1 – 5] та запитальні системи ідентифікації за ознакою «свій-чужий» [6 – 9]. Слід зазначити, що у існуючих мережах радіолокаційних систем спостереження супровід повітряних об'єктів (ПО), як правило, здійснюється за інформацією первинних радіолокаційних систем спостереження [10 – 14], а вторинні радіолокаційні системи спостереження використовуються у якості джерел додаткової радіолокаційної інформації [15 – 17]. Але перехід на автоматичне залежне спостереження [18 – 22, 10] передбачає обов'язкову наявність лише вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору. У зв'язку з цим, актуальними є питання оцінки якості виявлення повітряних об'єктів вторинними радіолокаційними системами, специфіка побудови та функціонування яких суттєво відрізняються від первинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору. Специфіка вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору обумовлена [23 – 42]:

- реалізацією літакового відповідача (ЛВ) вторинних радіолокаційних систем за принципом відкритої одноканальної системи масового обслуговування з відмовами [23 – 25];
- одноканальним принципом обслуговування сигналів запиту [26 – 28];
- використанням специфічних сигналів (інтервально-часових та позиційних кодів) у якості сигналів запиту та відповіді [29 – 32];
- несинхронним принципом побудови мережі вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору [33 – 36].

Ці особливості реалізації вторинних радіолокаційних систем спостереження та наявність значної інтенсивності навмисних та ненавмисних (внутрісистемних) завад [10] значної інтенсивності зумовили суттєве зменшення коефіцієнта готовності літакових відповідачів P_0 вторинних радіолокаційних систем [37, 38, 42]. При цьому слід зазначити, що коефіцієнт готовності літакових відповідачів є відносною пропускнуою здатністю літакового відповідача [23] інформаційних систем, що розглядаються. Ці обставини необхідно враховувати при реалізації пристроїв виявлення ПО за сигналами вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору.

Слід зазначити, що побудова існуючих вторинних радіолокаційних систем спостереження за принципом несинхронної мережі, де використовується обслуговування першого вірно прийнятого сигналу запиту та відкритої одноканальної системи масового обслуговування з відмовами [24], негативно впливає як на якість обробки радіолокаційної інформації, так і на процес виявлення повітряних об'єктів зазначеними інформаційними системами. Тобто така побудова зазначених радіолокаційних систем відкриває широкі можливості як до несанкціонованого використання відповідачів інформаційних систем, що розглядаються, для отримання координатної та польотної інформації, так і для повної паралізації літакових відповідачів шляхом постановки корельованих завад необхідної інтенсивності. Тому робота літакового відповідача в полі дії багатьох вторинних радіолокаційних систем спостереження, що створюють внутрісистемні завади значної інтенсивності, призводить до того, що коефіцієнт гото-

вності відповідача (КГ) P_0 завжди менше одиниці. При цьому слід зазначити, що коефіцієнт готовності літакового відповідача є функцією інтенсивності потоку сигналів запиту, утвореного потоком сигналів запиту від радіолокаційних систем спостереження, потоком навмисних корельованих завад, а також потоком сигналів запиту, що утворився з потоку навмисних та ненавмисних некорельованих завад.

Метою роботи є порівняльний аналіз оптимальної та квазіоптимальної структур виявлення повітряних об'єктів вторинними радіолокаційними системами.

Порівняльний аналіз якості виявлення повітряних об'єктів вторинними радіолокаційними системами спостереження повітряного простору

Виявлення ПО вторинними радіолокаційними системами здійснюється на підставі виявлення пачок прийнятих сигналів відповіді. Наявність кінцевого значення КГ ЛВ та присутність значної інтенсивності внутрісистемних та навмисних завад приводить до збільшення імовірності подавлення окремих імпульсів сигналів відповіді (СВ), що приводить до значного ускладнення алгоритмів виявлення ПО вторинними радіолокаційними системами. Тому особливу актуальність має завдання оптимізації виявлювача ПО, у зв'язку з наявністю значних потоків, як внутрісистемних, так і навмисних завад, що є характерним для інформаційних систем, що розглядаються [25 – 27].

Розглянемо задачу статистичного синтезу оптимального виявлювача ПО за пачкою сигналів відповіді з урахуванням коефіцієнта готовності ЛВ та імовірності подавлення окремих імпульсів сигналів відповіді при дії внутрісистемних та навмисних корельованих та некорельованих завад в каналі відповіді.

Будемо розглядати спільний вплив навмисних та внутрісистемних завад у каналі запиту, що включає: випромінювання СВ з імовірністю $(1 - P_0)$, внутрісистемних завад у каналі відповіді, які приводять до подавлення окремих СВ з імовірністю P_p , та флуктуаційних шумів з рівномірною характеристикою в смузі пропускання приймача системи вторинної радіолокації у каналі відповіді.

Позначимо вибірку бінарно-квантованих радіолокаційних спостережень повітряного простору, отриманих за k -м сигналом запиту вторинної радіолокаційної системи усередині деякого кільця дальності, через $Y_k = (y_{1k}, \dots, y_{nk})$, де y_{ik} приймають значення нуль або одиниця, $i = 1, 2, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, N$; n – значність коду СВ; N – загальне число СВ в пачці сигналів, що приймаються.

Якщо маємо гіпотезу H_1 про присутність у радіолокаційних спостереженнях сигналів із шумом, то в кожному сигналі запиту з імовірністю $(1 - P_0)P_p$ радіолокаційні спостереження створені тільки шумом і з імовірністю $P_0(1 - P_p)$ – сумою сигналу та шуму. Функцію правдоподібності (ФП) гіпотези наявності сигналу H_1 для пачки сигналів, які приймаються $\vec{Y} = \|Y_1, Y_2, \dots, Y_N\|$, у випадку, що розглядається, можливо записати у наступному виді:

$$L(\vec{Y} | H_1; P_0; P_p) = \prod_{k=1}^N \left\{ P_0(1 - P_p) \prod_{i=1}^n P_{11}^{y_{ik}}(k) (1 - P_{11}(k))^{1 - y_{ik}} + (1 - P_0) P_p \prod_{i=1}^n P_{01}^{y_{ik}} (1 - P_{01})^{1 - y_{ik}} \right\}, \quad (1)$$

де $P_{11}(k) = \int_{z_0}^{\infty} x \exp[-(x^2 + q_k^2)/2] I_0(q_k x) dx$, $q_k = qg(k)$; q – відношення сигнал/завада за центром діаграми спрямованості антени вторинної радіолокаційної системи; z_0 – поріг виявлення сигналів, $I_0(x)$ – функція Бесселя, $g(k)$ – діаграма спрямованості антени системи вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору.

При цьому можна зазначити, що функція правдоподібності (ФП) гіпотези H_0 , яка свідчить про відсутність сигнальної пачки СВ в радіолокаційних спостереженнях, дорівнює ФП гіпотези H_1 при $P_0 = 0$, тобто справедливе наступне співвідношення:

$$L(\bar{Y} | H_0) = L(\bar{Y} | H_1; 0). \quad (2)$$

Виходячи з викладеного вирішальне правило оптимального виявлення пачки СВ складається в порівнянні відношення правдоподібності прийнятої реалізації $l = \ln \left[L(\bar{Y} | H_1; P_o; P_p) / L(\bar{Y} | H_0) \right]$ з порогом виявлення l_0 .

При цьому слід зазначити, що для наведених виразів ФП (1) чи (2) оптимальне вирішальне правило виявлення ПО буде приймати вигляд

$$l = \sum_{k=1}^N \eta(k, s_k) \geq l_0, \quad (3)$$

де η – функція, яка визначає величинам s_k вагу $\eta(k, s_k)$, яку можна розрахувати за виразом

$$\eta(k, s_k) = \ln \left\{ P_o (1 - P_p) \left[\frac{P_{11}(k)}{P_{01}} \right]^{s_k} \left[\frac{1 - P_{11}(k)}{1 - P_{01}} \right]^{n - s_k} + (1 - P_o) P_p \right\}, \quad (4)$$

де через s_k позначене число виявлених імпульсів в k -му сигналі відповіді:

$$s_k = \sum_{i=1}^n y_{ik}, \quad 0 \leq s_k \leq n.$$

Відповідно до виразів (3) та (4), які вирішують правило виявлення повітряного об'єкта та містять у собі наступні операції: визначення кількості імпульсів, виявлених в k -му СВ, а також вибір заздалегідь розрахованої величини $\eta(k, s_k)$, яка залежить від положення даного сигналу запиту в пачці, отриманого в цьому запиті значення s_k , значення КГ P_0 та імовірності подавлення сигналів P_p .

Аналізуючи викладене, можна заключити, що оптимальне вирішальне правило виявлення пачки СВ вторинних радіолокаційних систем повинно враховувати значність коду сигналів n , коефіцієнт готовності літакового відповідача P_0 та імовірність подавлення СВ P_p . При цьому слід зазначити, що коли покласти $P_0 = 1$, $P_p = 0$ и $n = 1$, тоді співвідношення (3) та (4) є алгоритмом вагового виявлення пачки бінарно-квантованих сигналів для первинної радіолокаційної системи. В іншому окремому випадку, коли $P_0 = 1$ та $P_p = 0$, правило виявлення збігається з відомим правилом виявлення пачки сигналів при квантуванні огинаючої сигналу, що приймається, на $n + 1$ рівень.

Отримані вирази дозволяють побудувати схему оптимального виявлювача N бінарно-квантованих n -імпульсних сигналів відповіді радіолокаційної системи, що розглядається. Ускладнення отриманого алгоритму виявлення в порівнянні з відомим алгоритмом для первинних радіолокаційних систем полягає в тому, що необхідно використовувати лічильник для підрахунку імпульсів СВ та зберігання в запам'ятовувальному пристрої матриці вагових коефіцієнтів, які дозволяють врахувати КГ літакового відповідача та імовірність подавлення окремих імпульсів СВ.

Отримаємо розрахункові вирази для оцінки характеристик виявлення ПО розглянутого виявлювача. Значимо, що у КВ вторинних радіолокаційних систем відношення сигнал/завада досить велике. Це дозволяє приймати прямокутну апроксимацію діаграм спрямованості антени системи вторинних радіолокаторів.

При такій постановці питання для прямокутної огинаючої пачки СВ відношення сигнал/шум $q_k = q$ при $k = 1, \dots, N$ відповідно, а величина P_{11} не залежить від номера СВ в приймаємій пачці, а залежить лише від кількості виявлених у цьому сигналі відповіді імпульсів s_k .

Позначимо через r_s число СВ пачки усередині фіксованого кільця дальності, в кожному з яких виявлено s імпульсів, де $s=0,1,\dots,n$. Зазначимо, що з визначення r_s слідує, що $r_0 + r_1 + \dots + r_n = N$.

Поєднуючи в сумі (3) доданки з однаковими значеннями s_k та з огляду на те, що кількість таких складових дорівнює r_s , отримуємо наступний вид правила виявлення пачки СВ вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору:

$$l = \sum_{s=0}^n r_s \eta(s) \geq l_0, \quad (5)$$

де $\eta(s)$ визначається за виразом (4), в котрому як P_{11} , так і P_{01} не залежать від k .

Зазначимо, що з виразу (2) слідує, що імовірність хибної тривоги F для системи вторинних радіолокаційних систем збігається з імовірністю правильного виявлення, якщо КГ ЛВ дорівнює нулю. Для цього випадку отримаємо вираз тільки для ймовірності правильного виявлення. Тоді випадкові величини r_0, r_1, \dots, r_n , як правило, підпорядковуються поліноміальному розподілу, що дозволяє записати вираз для імовірності правильного виявлення:

$$D = \sum_{\substack{r_0 + \dots + r_n = N \\ r_s > 0}} \frac{N!}{r_0! r_1! \dots r_n!} \prod_{s=0}^n \left\{ P_0 (1 - P_p) C_n^s P_{11}^s (1 - P_{11})^{n-s} + (1 - P_0) P_p C_n^s P_{01}^s (1 - P_{01})^{n-s} \right\}^{r_s}. \quad (6)$$

Підсумовування у зазначеному виразі (6) має проводитись за всіма наведеними числами N у вигляді суми n невід'ємних складових r_0, r_1, \dots, r_n , для яких виконується умова виявлення (5). Як слідує з наведеного виразу, імовірність правильного виявлення пачки СВ суттєво залежить від КГ літакового відповідача та імовірності подавлення окремих імпульсів СВ.

Для СВ з значністю інтервально-часового коду $n=2$ умова виявлення (5) приймає наступний вид:

$$r_1 + \omega r_2 \geq c. \quad (7)$$

Відповідно до умови (7) виявлення пачки двохімпульсних СВ вторинними радіолокаційними системами зводиться до порівняння з порогом суми числа r_1 СВ з одним виявленим імпульсом і взятого з вагою ω числа кодів відповіді із двома виявленими імпульсами r_2 . При цьому слід зазначити, що величина ваги показує, наскільки при виявленні ПО сигнали відповіді із двома виявленими імпульсами цінніше, ніж СВ з одним виявленим імпульсом. У випадку, якщо завада у каналі відповіді відсутня, тобто $P_p = 0$, величина ваги дорівнює двом і умова (7) зводиться до порівняння з порогом сумарного числа імпульсів у пачці СВ.

Якщо позначити через A_i імовірність виявлення i імпульсів у відповідному СВ ($i=1,2$), то можна записати такі вирази:

$$A_0 = P_0 P_{10}^2 + (1 - P_0) P_{00}^2, \quad A_2 = P_0 P_{11}^2 + (1 - P_0) P_{01}^2, \quad A_1 = 2P_0 P_{11} P_{10} + 2(1 - P_0) P_{01} P_{00}.$$

Тоді вираз для імовірності правильного виявлення повітряного об'єкта вторинними радіолокаційними системами приймає вид

$$D = \sum_{\substack{0 \leq r_i \leq N \\ r_0 + r_1 + r_2 = N}} \frac{N!}{r_0! r_1! r_2!} A_0^{r_0} A_1^{r_1} A_2^{r_2}.$$

Підсумовування в даному виразі також робиться за всіма представленнями числа N у вигляді суми n невід'ємних складових r_0, r_1, \dots, r_n , для яких виконується умова виявлення.

При цьому слід зазначити, що так як $r_0 = N - r_1 - r_2$, то множник, що містить факторіали, є добутком біноміальних коефіцієнтів:

$$\frac{N!}{r_0!r_1!r_2!} = \frac{N!(N-r_2)!}{r_2!(N-r_2)!r_1!(N-r_2-r_1)!} = C_N^{r_2} C_{N-r_2}^{r_1}.$$

Перетворюючи умови підсумовування величин, отримаємо

$$D = \sum_{r_2=0}^N \sum_{r_1=\max\{0, c-wr_2\}}^{N-r_2} C_N^{r_2} C_{N-r_2}^{r_1} A_0^{N-r_1-r_2} A_1^{r_1} A_2^{r_2} = \sum_{r_2=0}^N C_N^{r_2} A_2^{r_2} \sum_{r_1=\max\{0, c-wr_2\}}^{N-r_2} C_{N-r_2}^{r_1} A_0^{N-r_1-r_2} A_1^{r_1}, \quad (8)$$

що і є оптимальним алгоритмом виявлення ПО вторинними радіолокаційними системами спостереження повітряного простору.

Зазначимо, що обробка СВ у вторинних радіолокаційних системах в сучасному використанні включає декодування СВ за цілочисловою логікою обробки n/n . Це обставина виключає з процесу виявлення ту частину імпульсів СВ, які залишилися після подавлення окремих імпульсів СВ у каналі відповіді. Імовірність проходження корисних та хибних сигналів через дешифратор для такої обробки сигналів можливо визначити виходячи з наступних виразів:

$$D_{11} = P_{11}^n; \quad F_{01} = P_{01}^n,$$

тому що сигнали на виході дешифратора x_k при надходженні на його вхід Y_k є результатом логічного множення.

ФП гіпотези H_1 для пачки декодованих сигналів, що приймаються, можливо записати у вигляді співвідношення

$$L(\bar{X} | H_1; P_0; P_p) = \prod_{k=1}^N \left\{ P_0(1-P_p) \prod_{i=1}^n D_{11}^{x_{ik}} (1-D_{11})^{1-x_{ik}} + (1-P_0)P_p \prod_{i=1}^n F_{01}^{x_{ik}} (1-F_{01})^{1-x_{ik}} \right\}.$$

У зазначеному випадку оптимальне вирішальне правило виявлення пачки, яка попередньо минула дешифратор СВ, зводиться до цифрового накопичення та порівняння з порогом числа декодованих СВ. Значення порога виявлення в цьому випадку також залежить від КГ ЛВ та імовірності подавлення СВ.

Імовірність правильного виявлення пачки СВ після декодування можна визначити з виразу

$$D = \sum_{j=c_1}^N C_N^j \left[P_0(1-P_p)D_{11} + (1-P_0)P_p F_{01} \right]^j \left[P_0(1-P_p)(1-D_{11}) + (1-P_0)P_p(1-F_{01}) \right]^{N-j}, \quad (9)$$

де c_1 – поріг прийняття рішення.

Таким чином, оптимізація виявлення пачки декодованих СВ зводиться до вибору порогів виявлення як і для синтезованого виявлювача, тобто з урахуванням КГ ЛВ та імовірності подавлення імпульсів СВ.

Проведемо порівняльну оцінку якості виявлення ПО за пачкою СВ синтезованого (оптимального) (8) та квазіоптимального (9) виявлювачів повітряних об'єктів для СВ с $n=2$. Імовірність правильного виявлення при постійному значенні імовірності хибної тривоги на виході виявлювача ПО, розраховану за виразом (8) з постійними параметрами P та w , наведено на рис. 1. Розрахунки виконано при $C/N=0,3$; $N=27$; $q=2$ і для різних значень $P = P_0(1-P_p)$. Як слідує з рис. 1, при $P=1$ найкращі результати отримуємо для $w=2$, а зі зменшенням значення P величина оптимальної ваги збільшується. Так, при $P=0,6$ оптимальна вага складає $w=2,4$, а при $P=0,4$ найкращі результати отримуються для $w=3$.

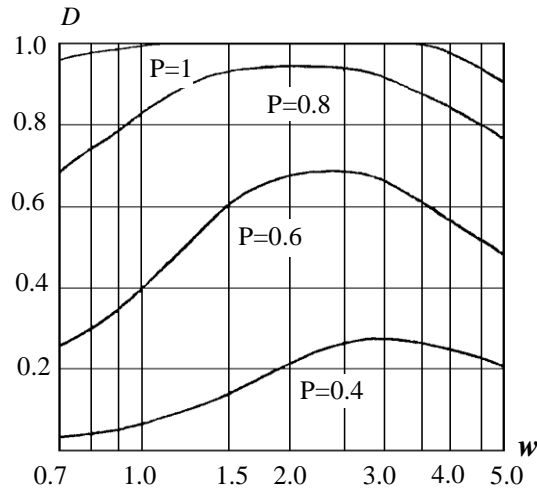


Рис. 1. Залежність $D = f(w, P)$

Для кожного значення співвідношення сигнал/завада, КГ ЛВ та імовірності подавлення СВ, як для синтезованого, так і для реалізованого у вторинних радіолокаційних системах алгоритмів виявлення ПО за пачкою СВ існують оптимальні значення як порогів, так і ваг, що забезпечують максимум D при постійній імовірності хибної тривоги F .

Для реалізованого у вторинних радіолокаційних системах квазіоптимального виявлювача, що порівнює з порогом c_1 (9), загальне число дешифрованих СВ, також існує оптимальне значення порога, яке залежить від відношення сигнал/завада і величини P . Зі збільшенням співвідношення сигнал/завада і зниженням P оптимальне значення порога збільшується при підтримці постійної величини імовірності хибної тривоги вибором відповідного порога виявлення.

У порівнянні із синтезованим виявлювачем повітряних об'єктів, що порівнює з порогом число декодованих СВ, програє в пороговому сигналі 1–1,5 дБ, за умови вибору для кожного з виявлювачів оптимальних для них значень порогових рівнів і ваг.

Програш у граничному сигналі при виборі постійного порога виявлення c_1 пачки дешифрованих СВ замість оптимального змінного c_1 , який максимізує імовірність виявлення D при постійній F , також суттєво залежить від величини P (рис. 2).

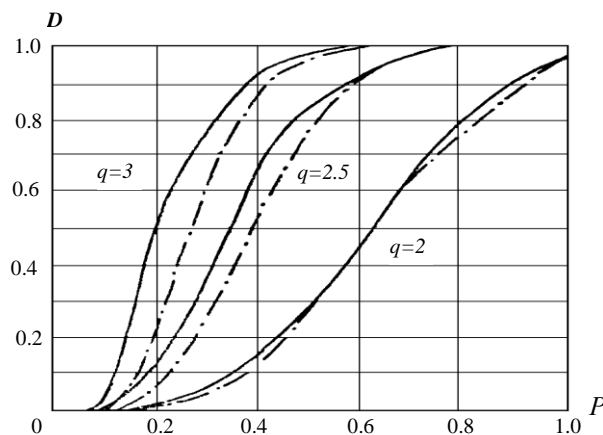


Рис. 2. Залежність $D = f(q, P)$

Для виявлення пачки СВ після декодування при $P < 1$ та досить великому співвідношенні сигнал/завада оптимальне значення порога виявлення наближається до одиниці (рис. 2). При

цьому варто відмітити, що величина q , при якій виконується ця умова, залежить від довжини пачки СВ, КГ ЛВ і ймовірності подавлення СВ.

Зазначимо, що вторинні радіолокаційні системи реалізуються на принципі несинхронної мережі, що дозволяє захистити запитувачі від несинхронних завад. Ця обставина та результати, які наведено на рис. 3, дозволяють зробити висновок, що поріг виявлення ПО для вторинних радіолокаційних систем при впливі як внутрісистемних, так і навмисних завад у КЗ та КВ варто вибрати незначним.

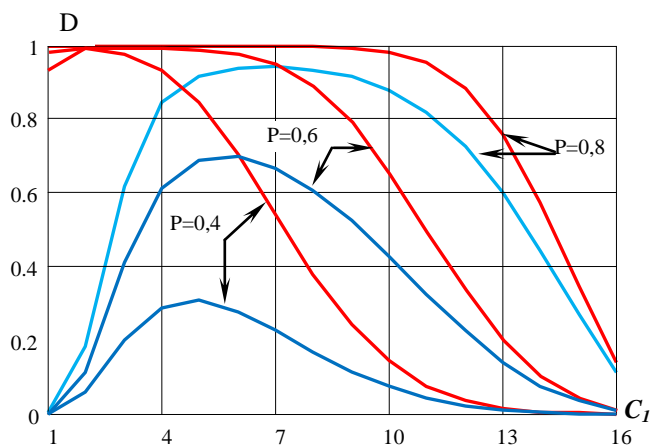


Рис. 3. Ймовірність виявлення як функція порогу виявлення

Аналіз характеристик виявлення показує, що оптимальні пороги виявлення ПО за пачкою СВ суттєво залежать від КГ ЛВ та ймовірності подавлення окремих імпульсів СВ у КВ. Застосування ж декодування СВ та наступного накопичення при виборі оптимального порога суттєво знижує характеристики виявлення в порівнянні з оптимальною обробкою пачки СВ (рис. 3). Так, при порозі виявлення, що дорівнює 7 та величині $P=0,8$, ймовірність виявлення ПО для оптимального алгоритму складає 1, а для квазіоптимального – 0,95. При $P=0,6$ ймовірності відповідно дорівнюють 0,95 та 0,7, а при $P=0,4$ – відповідно 0,55 та 0,23.

Розглянемо область великих значень співвідношень сигнал/завада, при яких флуктуаційними завадами у КВ можна знехтувати. У цьому випадку характеристики виявлення визначаються довжиною відповідної пачки прийнятих сигналів, КГ ЛВ та ймовірністю подавлення окремих імпульсів СВ у КВ.

Ймовірності правильного виявлення пачок СВ для оптимального та квазіоптимального алгоритмів, при постійних значеннях N та P , сходяться до границі

$$D = \sum_{i=c}^N C_N^i P^i (1-P)^{N-i}, \quad (10)$$

величина якої залежить від цифрового порога виявлення c .

При заданих значеннях D, N та c вираз (10) являє собою рівняння відносно P . Корінь цього рівняння є граничним значенням КГ та ймовірності подавлення імпульсів СВ P , що має наступні властивості:

- якщо P більше за порогове значення, то для КВ вторинних радіолокаційних систем існує таке значення співвідношення сигнал/завада, що при заданому P забезпечує задане значення ймовірності правильного виявлення ПО;

- якщо $P < P^*(D, N, c)$, то незалежно від значення співвідношення сигнал/завада у каналі відповіді низький КГ ЛВ та висока ймовірність подавлення імпульсів СВ не дозволяють ймовірності D досягти заданої величини при фіксованих N та c . На відміну від співвідношення сигнал/завада збільшення довжини пачки сигналів, що приймаються, завжди дозволяє досягти заданої величини ймовірності D незалежно від значення P .

На рис. 4 наведено залежності порогового значення P від довжини пачки N сигналів, що приймаються, для різних значень імовірності виявлення D . Суцільна крива відповідає порогові, що дорівнює одиниці, штрихова крива – порогові, що дорівнює двом. Як видно з рис. 4, імовірність правильного виявлення, що дорівнює 0,95 при $N=12$ та виборі порога, рекомендованого для первинної радіолокаційної системи, досягається при $P=0,4$, у той час як при виборі порога, що дорівнює двом, ця ймовірність досягається при $P=0,22$. Це вказує на те, що вибір порога для виявлення сигналів вторинними радіолокаційними системами суттєво відрізняється від оптимального порога виявлення для первинних радіолокаційних систем.

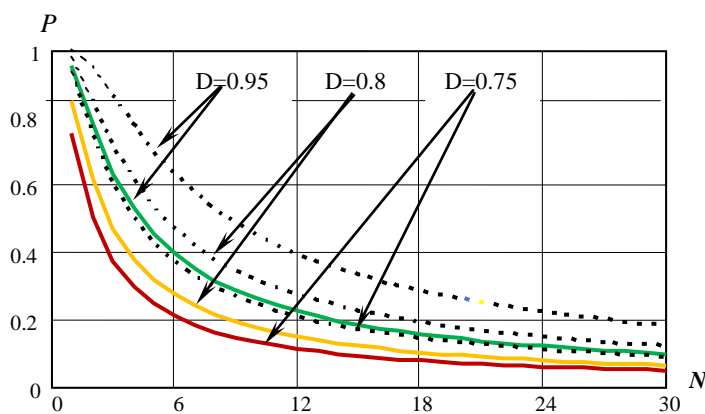


Рис. 4. Залежність $P=f(D,N)$

Таким чином, підвищення імовірнісних характеристик системи вторинних радіолокаційних систем при роботі ЛВ у полі значних потоків навмисних та внутрісистемних завад забезпечується вибором порогів виявлення залежно від значень КГ відповідача та імовірності подавлення окремих імпульсів СВ. З іншого боку, застосування оптимальних для даних умов роботи відповідача порогів виявлення на системах вторинних радіолокаційних систем дозволяє знизити вимоги до пропускної здатності ЛВ при значній інтенсивності потоків внутрісистемних та навмисних корельованих завад.

Висновки

Аналіз характеристик виявлення повітряних об'єктів системами вторинних радіолокаційних систем показує що:

1. Оптимальні пороги виявлення повітряних об'єктів в системах вторинної радіолокації суттєво залежать від коефіцієнта готовності літакового відповідача та імовірності подавлення окремих імпульсів сигналів відповіді в каналі відповіді.
2. Використання декодування сигналів відповіді та подальшого накопичення при виборі оптимального порога значно знижує показники якості виявлення в порівнянні з оптимальною обробкою пачки сигналів відповіді.
3. Цифровий поріг виявлення повітряних об'єктів системою вторинної радіолокації значною мірою залежить від імовірності подавлення сигналів в каналі запиту та каналі відповіді.

Список літератури:

1. M. Leonardi and D.D. Fausto. Secondary Surveillance Radar Transponders classification by RF fingerprinting // 2018 19th International Radar Symposium (IRS), 2018, pp. 1–10. doi: 10.23919/IRS.2018.8448244.
2. M. Skolnik. Improvements for air-surveillance radar // Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. Radar into the Next Millennium (Cat. No.99CH36249), 1999, pp. 18–21. doi: 10.1109/NRC.1999.767195.
3. I. Obod, I. Svyd, O. Maltsev and S. Starokozhev. The Effect of Masking Interference on the Quality of Request Signal Detection in Aircraft Responders of the Identification Friend or Foe Systems // 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2020, pp. 721–726. doi: 10.1109/PICST51311.2020.9467955.

4. F. L. Neindre, G. Ferre, D. Dallet, F. Letellier and K. Pitois. A Successive Interference Cancellation-based Receiver for Secondary Surveillance Radar // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022. doi: 10.1109/TAES.2022.3193649.
5. M. Barbary, A. S. Hafez and T. Crew. An Industrial Design and Implementation Approach of Secondary Surveillance Radar System // *2021 International Telecommunications Conference (ITC-Egypt)*, 2021, pp. 1–9. doi: 10.1109/ITC-Egypt52936.2021.9513961.
6. О.П. Черних, І.І. Обод, І.В.Свид. Інформаційне забезпечення на основі мереж спостереження повітряного простору // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2/9(50) 2011. Харків, 2011. С. 23–25. doi: 10.15587/1729-4061.2011.1850.
7. I. Svyd et al. Fusion of Airspace Surveillance Systems Data // *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, 2019. doi :10.1109/aiact.2019.8847916
8. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, V. Andrusевич, B. Bakumenko and O. Vorgul. Optimal Measurement of Signal Data Parameters of Requesting Radar Systems // *2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, 2021, pp. 138–141. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575235.
9. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev and A. Hlushchenko. Secondary Surveillance Radar Response Channel Information Security Improvement Method // *2020 IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, 2020, pp. 341–345. doi: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125018.
10. Свид І. В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору : монографія. / І. В. Свид. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 224 с.
11. Y. Jiang, Z. Yang, C. Bo, and D. Zhang. Continuous IFF response signal recognition technology based on capsule network // *Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, 2021, pp. 455–468. doi: 10.1007/978-3-030-90196-7_39.
12. I. Svyd, I. Obod and O. Maltsev. Interference Immunity Assessment Identification Friend or Foe Systems // Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol 69. Springer, Cham, pp. 287–306, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-71892-3_12.
13. T. M. Schuck, B. Shoemaker and J. Willey. Identification friend-or-foe (IFF) sensor uncertainties, ambiguities, deception and their application to the multi-source fusion process // *Proceedings of the IEEE 2000 National Aerospace and Electronics Conference. NAECON 2000. Engineering Tomorrow (Cat. No.00CH37093)*, 2000, pp. 85–94. doi: 10.1109/NAECON.2000.894896.
14. Толюпа С.В., Дружинін В.А., Гордієвський О.Т. Розпізнавання групових об'єктів у багатопозиційних системах оперативного супроводження // *Сучасний захист інформації*. 2012. № 1. С. 66–70.
15. Обод І.І., Стрельницький О.О. Інформаційна безпека інформаційної мережі систем спостереження повітряного простору // *Системи обробки інформації*. 2015. № 9(134). С. 96–98.
16. V. Semenets et al. Quality Assessment of Measuring the Coordinates of Airborne Objects with a Secondary Surveillance Radar // Ageyev D., Radivilova T., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2021. Vol 69. Springer, Cham, pp. 105–125. doi: 10.1007/978-3-030-71892-3_5.
17. I. Ivashko, O. Krasnov and A. Yarovoy. Performance analysis of multisite radar systems // *2013 European Microwave Conference*, 2013, pp. 1771–1774. doi: 10.23919/EuMC.2013.6687021.
18. Обод І.І., Стрельницький О.О. Захист інформації в мережі систем спостереження повітряного простору // *Системи обробки інформації*. 2016. № 2(139). С. 47–49.
19. J. Xu, X.-Z. Dai, X.-G. Xia, L.-B. Wang, J. Yu and Y.-N. Peng. Optimizations of Multisite Radar System with MIMO Radars for Target Detection // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 2329–2343, OCTOBER 2011. doi: 10.1109/TAES.2011.6034636.
20. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, O. Vorgul, V. Chumak and B. Bakumenko. Estimation of the Spatial Coordinates of Air Objects in Synchronous Radar Networks for Airspace Observation // *2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, 2021, pp. 425–428. doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772227.
21. Обод І.І., Булай А.Н., Луценко Ю.А. Оценка точности определения местоположения воздушных объектов в синхронных информационных сетях радиолокации // *Системи обробки інформації*. 2006. № 9(58). С. 69–75.
22. Обод І.І., Булай А.Н., Луценко Ю.А. Оценка точности определения местоположения воздушных объектов в синхронных информационных сетях // *Системи обробки інформації*. 2006. № 9(58). С. 69–71.
23. H. You, X. Jianjuan, G. Xin. Radar Data Processing with Applications // *Publishing House of Electronics Industry*. 2016. doi: 10.1002/9781118956878.
24. Chen Su, Chuanyun Zou, Liangyu Jiao, Qianglin Zhang. A MIMO Radar Signal Processing Algorithm for Identifying Chipless RFID // *Tags. Sensors (Basel)*. 2021 Dec 12;21(24):8314. doi: 10.3390/s21248314
25. Обод І.І., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Методи підвищення якості інформаційного забезпечення системами спостереження повітряного простору // *Системи обробки інформації*. 2014. № 4(120). С. 53–55.
26. Обод І.І., Шевцова В.В. Порівняльний аналіз запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // *Зб. наук. пр. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил*. 2013. № 1(34). С. 123–125.

27. І. Обод, І. Свид, О. Мальцев. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору : навч. посібник. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
28. J. Li, P. Stoica. MIMO Radar Signal Processing. Wiley-IEEE Press, 2008. 448 p.
29. S. M. Wu, G. A. Ybarra and W. E. Alexander. A complex optimal signal-processing algorithm for frequency-stepped CW data // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, vol. 45, no. 6, pp. 754–757, June 1998. doi: 10.1109/82.686697.
30. Толюпа С.В., Дружинін В. А., Наконечний В.С., Цьопа Н.В., Батрак Є.О. Методи та алгоритми обробки радіолокаційної інформації у багатопозиційних системах зі змінною просторовою конфігурацією. К.: Логос, 2014, 230 с.
31. Обод И.И. Обнаружение воздушных целей системой вторичной радиолокации // Радиотехника и компьютерные системы. 2005. № 3. С.25–28.
32. G. Lee, S. Lee, K. Kim and N. Kwak. Probabilistic Track Initiation Algorithm Using Radar Velocity Information in Heavy Clutter Environments // 2018 15th European Radar Conference (EuRAD), 2018, pp. 277–280. doi: 10.23919/EuRAD.2018.8546666.
33. Conte, E., Daddio, E., Farina, A., and Longo, M. Multistatic radar detection – Synthesis and comparison of optimum and suboptimum receivers // IEE Proceedings F: Communications Radar and Signal Processing, vol. 130, no. 6, pp. 484–494, 1983.
34. I. Prokopenko, V. Vovk and K. Prokopenko. Fast resource management algorithm for multi-position radar systems // 2015 16th International Radar Symposium (IRS), 2015, pp. 1045–1051. doi: 10.1109/IRS.2015.7226339.
35. V. Andrushevich and I. Obod. Assessment of the Quality of Information Support by Air Radar Surveillance Systems // Advanced Information Systems, vol. 5, no. 2, pp. 78–82, 2021. doi: 10.20998/2522-9052.2021.2.10.
36. I. Prokopenko, V. Vovk, S. Stavitsky and V. Medvedev. Optimization of use of resource in multi-position radar systems // 2014 IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), 2014, pp. 92–97. doi: 10.1109/MRRS.2014.6956673.
37. I. Obod et al. Optimization of Data Processing Structure for Multi-Position Radar Surveillance Systems // 2021 IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 2021, pp. 133–137. doi: 10.1109/UKRCON53503.2021.9575286.
38. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, O. Vorgul, I. Vorgul and I. Shevtsov. Method for Increasing the Interference Immunity of the Channel for Measuring of the Short-Range Navigation Radio System // 2022 IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2022, pp. 802–807. doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767069.
39. I. Shevtsov et al. A Method for Increasing the Capacity of Radio Systems of Short-Range Navigation // 2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Ukraine, 2022, pp. 629–633. doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037138.
40. S. Starokozhev et al. Frequency Efficiency Evaluation of Query Airspace Surveillance Systems // 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 501–505. doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772190.
41. S. Starokozhev et al. Optimization of the Probability of Transmission of Flight Data in the Response Channel of Secondary Radar Systems // 2021 IEEE 8th International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, Ukraine, 2021, pp. 511–515. doi: 10.1109/PICST54195.2021.9772199.
42. V. Semenets et al. Method of increasing the relative throughput of requesting radar systems // Przegląd Elektrotechniczny, vol. 1, no. 11, 2022, pp. 99–103. doi: 10.15199/48.2022.11.17.

Надійшла до редколегії 21.05.2023

Відомості про автора:

Свид Ірина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, завідувач кафедри мікропроцесорних технологій і систем; Харків, Україна; email: iryna.svyd@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4635-6542>