

СИНТЕЗ І АНАЛІЗ ВИЯВЛЮВАЧА ТРАС ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗАПИТАЛЬНОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Вступ

Створення єдиного радіолокаційного простору неможливе без впровадження однієї інформаційної мережі на основі існуючих та перспективних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору.

В існуючих інформаційних мережах радіолокаційних систем спостереження супровід повітряних об'єктів, як правило, здійснюється за інформацією первинних радіолокаційних систем спостереження [1 – 4], а вторинні радіолокаційних систем спостереження використовуються як джерела додаткової радіолокаційної інформації [5 – 8]. У той самий час, перехід на автоматичне залежне спостереження [9 – 12] передбачає обов'язкову наявність лише вторинних радіолокаційних систем спостереження. У зв'язку з цим актуальними є питання розробки методів та алгоритмів супроводу повітряних об'єктів за інформацією вторинних радіолокаційних систем спостереження. При цьому специфіка побудови та функціонування вторинних радіолокаційних систем спостереження суттєво відрізняється від первинних радіолокаційних систем спостереження.

Вказана специфіка вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору обумовлена [13 – 16]:

- реалізацією літакового відповідача за принципом відкритої системи масового обслуговування з відмовами;
- одноканальним принципом обслуговування сигналів запиту;
- використання специфічних сигналів (інтервально-часових кодів, позиційних кодів) у якості сигналів запиту та відповіді;
- несинхронним принципом побудови мережі запитальних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору.

Наведені особливості реалізації запитальних радіолокаційних систем спостереження та наявність навмисних/ненавмисних (внутрісистемних) завад зумовили кінцеве значення коефіцієнта готовності відповідачів P_0 запитальних радіолокаційних систем спостереження. Таким чином, ця обставина повинна бути враховуватися при реалізації пристроїв супроводу повітряних об'єктів за інформацією запитальних радіолокаційних систем спостереження. У роботах [17 – 20] розглянуто синтез оптимального виявлювача трас повітряних об'єктів в єдиній постановці питання виявлення в інформаційних системах: виявлювач сигналів запиту, виявлювач сигналів відповіді, виявлювач повітряного об'єкта і власне виявлювач траєкторії.

Однак послідовність виконуваних процедур виявлення дозволяє реалізувати виявлювачі трас повітряних об'єктів з проміжними прийняттями рішень про виявлення сигналів відповіді, виявлення повітряних об'єктів та виявлення траси повітряних об'єктів.

При цьому слід зазначити, що зміна структури інформаційного забезпечення системи контролю повітряного простору, яка обумовлена переходом до автоматичного залежного спостереження [21 – 24] дещо змінює підхід до інформаційного забезпечення споживачів. Так, перехід вторинних радіолокаційних систем спостереження до основних джерел радіолокаційної інформації ставить задачу реалізації супроводу повітряних об'єктів за інформацією цих радіолокаційних систем спостереження. Необхідно також відзначити, що раніше функція супроводу повітряних об'єктів вирішувалася тільки на основі радіолокаційної інформації первинних радіолокаційних систем спостереження [25 – 27]. Якщо теорія і практика побудови фільтрів супроводу повітряних об'єктів за інформацією первинних радіолокаційних систем спостереження досить докладно розглянута в існуючій технічній літературі

[1, 28 – 31], то розгляд указаних питань для вторинних радіолокаційних систем спостереження має деякі прогалини [32 – 35]. Дійсно, специфіка побудови вторинних радіолокаційних систем спостереження зумовила наявність деяких параметрів, які відсутні в первинних радіолокаційних системах спостереження [36 – 39].

При цьому слід зазначити, що вторинна та третина обробка радіолокаційної інформації в системі контролю використання повітряного простору, як правило, завжди виконувалася з використанням інформаційних технологій [1 – 4]. Переваги широкого використання цифрової обробки сигналів дозволили застосувати інформаційні технології обробки радіолокаційної інформації з етапу первинної обробки радіолокаційної інформації. Це дозволило підвищити ефективність інформаційного забезпечення споживачів та здійснити сумісну оптимізацію обробки сигналів первинної і вторинної обробки радіолокаційної інформації.

Побудова існуючих вторинних радіолокаційних систем спостереження за принципом несинхронної мережі, обслуговування першого вірно прийнятого сигналу запиту та відкритої одноканальної системи масового обслуговування з відмовами [4, 40 – 42] негативно впливає на якість обробки інформації вторинних запитальних систем. Така побудова останніх відкриває широкі можливості з несанкціонованого використання відповідачів інформаційних систем, що розглядаються, а також для повної паралізації літакових відповідачів шляхом постановки корельованих завад необхідної інтенсивності. Так, робота літакового відповідача у полі дії багатьох вторинних радіолокаційних систем спостереження, що створюють внутрісистемні завади, призводить до того, що коефіцієнт готовності відповідача P_0 завжди менше одиниці. Коефіцієнт готовності відповідача залежить від інтенсивності потоку сигналів запиту, утвореного потоком сигналів запиту від запитальних радіолокаційних систем спостереження, потоком навмисних корельованих завад, а також потоком сигналів запиту, що утворився з потоку навмисних і ненавмисних некорельованих завад [43 – 46].

Синтезуємо структуру виявлювача траси повітряних об'єктів за інформацією запитальних радіолокаційних систем спостереження єдиної інформаційної мережі з проміжними прийняттями рішень щодо виявлення сигналів, повітряних об'єктів і трас.

Синтез виявлювача траси повітряних об'єктів запитальних радіолокаційних систем

Синтезуємо виявлювач, в якому рішення щодо виявлення траси повітряних об'єктів приймається на основі перевищення суми одиничних рішень про виявлення сигналів відповіді запитальних радіолокаційних систем спостереження x_{ijk} , де $i = \overline{1..n}$, $j = \overline{1..N}$, $k = \overline{1..K}$, де n – значність інтервально-часового коду сигналів відповіді, N – число сигналів відповіді у пачці сигналів, що приймаються, K – число відміток повітряних об'єктів, за якими приймається рішення про виявлення траси з вагами, що визначаються показниками якості виявленого імпульсів запиту, порогового рівня, обчисленого на основі певного критерію. При цьому слід зазначити, що наявність єдиного порогового пристрою прийняття рішення про виявлення траси повітряних об'єктів дещо ускладнює реалізацію синтезованої структури виявлювача траси повітряних об'єктів.

Легко побачити, що викладена процедура виявлення траси повітряних об'єктів складається з трьох процедур виявлення, кожна з яких ідентична за підходом до синтезу оптимального виявлювача трас повітряних об'єктів. Розглянемо її.

Після прийняття рішення про виявлення сигналів відповіді на подальшу обробку надходить реалізація $x_l = 1$, якщо в елементі часового дозволу $l = \overline{1..L}$, $L = n(N)(K)$, що відповідає аналізованому просторовому дозволу, відбулося перевищення порога; якщо ж не сталося – $x_l = 0$.

Для прийняття рішення про наявність або відсутність сигналу при сумісній обробці піддається обробці сукупність нулів і одиниць x_l . Вочевидь, що x_l – випадкова величина, яка підпорядковується розподілу Бернуллі:

$$P(x_l) = P_l^{x_l} (1 - P_l)^{1-x_l}, \quad (1)$$

де P_l – імовірність перевищення порога в l -м каналі обробки. При відсутності сигналу $P_l = F_l$ – імовірність хибної тривоги, а при дії сигналу $P_l = P_0 D_l$ – імовірність виявлення. У подальшому будемо вважати, що коефіцієнт готовності літакового відповідача входить у імовірність виявлення сигналів запиту.

Завдання виявлення сигналів відповіді можна розглядати у різних постановках. Дійсно, в аналізованому виявлювачі можливе керування напругою порога спрацювання вихідного порогового пристрою, а також напругою порога вхідного порогового пристрою. Розглянемо показники виявлювача під час управління величиною порога лише у вихідному пороговому пристрою, тобто у значно вужчій постановці питання.

Будемо вважати, що на вхід пристрою спільної обробки сигналів надходить сукупність випадкових величин x_l . Імовірності всіх можливих комбінацій x_l , як при відсутності, так і за наявності сигналу (гіпотези H_0 і H_1), тобто, $P(x_{ij}|H_0)$ та $P(x_{ij}|H_1)$, довільні, однак відомі. Для кожної конкретної сукупності x_l можливо сформулювати відношення правдоподібності:

$$\Lambda = P(x_l|H_1)/P(x_l|H_0). \quad (2)$$

Порівняння відношення правдоподібності Λ з порогом, визначеним за допустимою імовірністю хибної тривоги, забезпечує оптимальне за критерієм Неймана – Пірсона рішення про наявність або відсутність сигналу. Так як шуми у каналах обробки незалежні, то можна записати співвідношення

$$P(x_1, \dots, x_L|H_0) = \prod_{l=1}^L P(x_l|H_0) = \prod_{l=1}^L F_l^{x_l} (1 - F_l)^{1-x_l}. \quad (3)$$

Можна стверджувати, що при впливі сигналу перевищення порогів у каналах обробки сигналів – незалежні події. В цьому разі

$$P(x_1, \dots, x_L|H_1) = \prod_{l=1}^L P(x_l|H_1) = \prod_{l=1}^L D_l^{x_l} (1 - D_l)^{1-x_l}. \quad (4)$$

З урахуванням виразів (3) та (4) загальний вираз відношення правдоподібності можна записати у наступному вигляді:

$$\Lambda = \prod_{l=1}^L D_l^{x_l} (1 - D_l)^{1-x_l} / \prod_{l=1}^L F_l^{x_l} (1 - F_l)^{1-x_l}. \quad (5)$$

Здійснимо логарифмування виразу (5), отримаємо вираз

$$\ln \Lambda = \sum_{l=1}^L x_l (\ln D_l - \ln F_l) + (1 - x_l) [\ln(1 - D_l) - \ln(1 - F_l)]$$

Позначимо множники при випадкових величинах x_l як

$$Q_l = \ln D_l - \ln F_l - \ln(1 - D_l) + \ln(1 - F_l) = \ln \left[\frac{D_l(1 - F_l)}{(1 - D_l)F_l} \right] \quad (6)$$

та відкинемо доданки, які не залежать від x_l , тоді отримаємо оптимальний за критерієм Неймана – Пірсона алгоритм виявлення при поєднанні попередніх рішень всіх каналів обробки:

$$\ln \Lambda = \sum_{l=1}^L Q_l x_l \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} z_0, \quad (7)$$

де z_0 – поріг, який визначається імовірністю хибної тривоги.

Отже, спільна обробка сигналів зводиться до вагового підсумовування одиниць і нулів x_l , що відображають прийняті у пасивному і в активному каналах обробки попередні рішення. Вагові коефіцієнти (6) підвищують роль каналу обробки, де вище імовірність D_l і нижче імовірність F .

Оскільки x_l рівні 0 або 1, то ліва частина (7) є сумою $k < Ln < MN$ вагових коефіцієнтів Q_l , а значить, може приймати лише певні дискретні значення. Значення порога z_0 в цьому випадку може лежати в межах $0 < z_0 < \sum_{l=1}^L Q_l$, щоб, з одного боку, не приймалося завжди тривіальне рішення про виявлення, а з іншого – тривіальне рішення про невиявлення. Якщо всі Q_l різні і сума будь-якої групи Q_l не збігається з сумою будь-якої іншої групи, то при різних комбінаціях значень x_l для розглянутого випадку можливі $2^L - 1$ різних значень $\ln \Lambda > 0$. Обираючи поріг виявлення в інтервалах між значеннями Q_l та їх різних сум, можна сформувати $2^L - 1$ різних правил виявлення.

При фіксованих імовірностях попередніх рішень у каналах обробки F_l та D_l різні вирішальні правила дають різні значення імовірностей F і D .

Отриманий алгоритм виявлення аналізованого випадку синтезу повторюється при різному числі сумованих ваг тричі, тобто здійснюються три процедури виявлення: 1) виявлення сигналів відповіді; 2) виявлення повітряного об'єкту; 3) виявлення траси повітряного об'єкту. У цьому випадку загальний вираз для вирішального правила виявлення трас повітряних об'єктів за інформацією запитальних радіолокаційних систем спостереження можна записати в наступному вигляді:

$$R = \sum_{k=1}^K Q_k \left(x_k = \left[\sum_{j=1}^N Q_j \left\{ x_j = \sum_{i=1}^n Q_i x_i \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} z_{01} \right\} \right] z_{02} \right) z_{03}, \quad (8)$$

де $z_{0i} (i = \overline{1-3})$ – пороги прийняття рішення кожною із зазначених процедур виявлення.

Коли виконується умова $F_i = F_0, P_{0i} D_i = D_0$, то $Q_1 = \dots = Q_k = Q, k = n(N)K$, тоді у виразі (8) можемо Q винести за знак суми та розділити обидві частини на постійну величину Q . За таких припущень вираз (8) можна записати як

$$R = \sum_{k=1}^K \left(x_k = \left[\sum_{j=1}^N \left\{ x_j = \sum_{i=1}^n x_i \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} z_{01} \right\} \right] z_{02} \right) z_{03}. \quad (9)$$

Як видно з (9), при всіх можливих x_i в кожному з попередніх виявлювачів, що розглядаються, величина $R > 0$ може приймати тільки m різних значень. У цьому випадку отримуємо відоме правило виявлення « k з m », згідно з яким сигнал вважається виявленим, якщо попереднє виявлення сталося хоча б у k з m каналів часової обробки. Легко бачити, що

$2^m - 1$ вирішальних правил, що витікають з (8), при незначних відмінностях у вагових коефіцієнтах включатимуть всі m вирішальних правил типу « k з m », що одержуються з (9).

Таким чином, характерною особливістю виявлювача трас повітряних об'єктів у цьому випадку є наявність чотирьох порогів. Перший поріг z_0 встановлюється в пороговий пристрій виявлювача сигналів коду у відповідь. Цей поріг аналоговий і його можна змінювати, тобто змінювати умовну імовірність хибної тривоги на виході виявлювача трас повітряних об'єктів. Тобто відбувається зміна кінцевої мети розглянутого виявлювача. Другий поріг z_{01} встановлюється в пороговий пристрій при виявленні сигналів у відповідь, третій z_{02} – при виявленні повітряних об'єктів. І четвертий z_{03} – при виявленні трас повітряних об'єктів. Ці пороги можуть бути аналоговими при реалізації алгоритму (8) або дискретними при реалізації алгоритму (9). У першому випадку вдається реалізувати $(2^n - 1)(2^N - 1)(2^K - 1)$ вирішальних правил, тоді як у другому – nNK .

Характерною особливістю такої реалізації (послідовного ухвалення рішення про попереднє виявлення) є те, що можна змінювати послідовність процедур виявлення. Зокрема можна реалізувати виявлювач трас у такій послідовності: виявлювач складових сигналів у відповідь; виявлювач сигналу у відповідь; виявлювач траси; виявлювач повітряних об'єктів. Вирішальне правило такої структури виявлювача трас повітряних об'єктів запитальними радіолокаційними системами спостереження можливо подати в наступному вигляді:

$$R = \sum_{k=1}^K \left(x_k = \left[\sum_{j=1}^N \left\{ x_j = \sum_{i=1}^n x_i \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} z_{01} \right\} \right] z_{03} \right) z_{02}. \quad (10)$$

Відмінність алгоритмів (9) та (10) позначається на схемній побудові виявлювачів трас повітряних об'єктів за інформацією запитальних радіолокаційних систем спостереження.

Таким чином, структура синтезованого квазіоптимального виявлювача трас повітряних об'єктів запитальними радіолокаційними системами спостереження більш уніфікована в схемно-технічній побудові.

Представляє інтерес проведення аналізу синтезованого алгоритму виявлення трас повітряних об'єктів запитальними радіолокаційними системами спостереження повітряного простору з метою порівняння якісних показників синтезованих структур виявлювачів.

Аналіз виявлювача траси повітряних об'єктів запитальних радіолокаційних систем

Будемо вважати, що на вхід запитальних радіолокаційних систем спостереження можуть надходити флуктуаційні та імпульсні (хаотичні, внутрісистемні тощо) завади. Проведемо порівняльний аналіз імовірності виявлення трас повітряних об'єктів за інформацією запитальних радіолокаційних систем спостереження. Модульність побудови виявлювача трас повітряних об'єктів, як показано вище, дозволяє розглядати цю структуру в наступних послідовностях попередніх виявлень:

- виявлювач повітряних об'єктів – виявлювач сигналів відповіді – виявлювач траси повітряних об'єктів (I варіант);
- виявлювач сигналів відповіді – виявлювач повітряних об'єктів – виявлювач траси повітряних об'єктів (II варіант);
- виявлювач повітряних об'єктів – виявлювач траси повітряних об'єктів – виявлювач сигналів відповіді – (III варіант).

Отримаємо математичні вирази для виявлення трас повітряних об'єктів запитальними радіолокаційними системами при використанні першого варіанту.

Будемо враховувати, що у виявлювачі повітряних об'єктів використовується логіка K/N , для виконання якої необхідна наявність імпульсів сигналів відповіді на одних і тих же ділянках дальності K із N запитів (тобто K виступає в якості цифрового порога виявлення

повітряного об'єкту). У пристрої виявлення сигналів відповіді застосовується логіка n/n , для виконання якої потрібна наявність усіх імпульсів в кожній повторній посилювачі. При цьому у пристрої виявлення траєкторій використовуються критерій виявлення траєкторій l/m .

При такій постановці питання імовірність виявлення повітряних об'єктів D_1 за результатами виявлення одиночних сигналів відповіді запитальних радіолокаційних систем для зазначеної логіки визначається наступним чином:

$$D_1 = \sum_{i=0}^{N-K} C_N^i P_0^{N-1} (1-P_0) \left[\sum_{l=0}^{N-K-i} C_{N-1}^l P_1^{N-l-i} (1-P_1)^l \right],$$

де P_1 – імовірність виявлення одиночних імпульсів сигналів відповіді.

Імовірність виявлення сигналів відповіді можна визначити з виразу

$$D_{11} = \sum_{i=0}^{N-K} C_N^i P_0^{N-1} (1-P_0) \left[\sum_{l=0}^{N-K-i} C_{N-1}^l P_1^{N-l-i} (1-P_1)^l \right]^n.$$

Імовірність виявлення траси повітряних об'єктів вторинною радіолокаційною системою спостереження для аналізованого варіанта побудови визначимо з виразу

$$D_{111} = \sum_{i=0}^m C_m^i D_{11}^i (1-D_{11})^{m-i}.$$

Отримаємо вирази для виявлення трас повітряних об'єктів для другого варіанта побудови виявлювача трас. Імовірність виявлення n -імпульсних сигналів відповіді

$$D_2 = P_1^n P_0.$$

Імовірність виявлення повітряних об'єктів на виході виявлювача повітряних об'єктів

$$D_{22} = \sum_{i=0}^{N-K} C_N^i (P_1^n P_0)^i.$$

В цьому разі імовірність виявлення трас повітряних об'єктів на виході виявлювача траси визначається як

$$D_{222} = \sum_{i=0}^m C_m^i D_{22}^i (1-D_{22})^{m-i}.$$

Отримаємо вираз для виявлення траси повітряних об'єктів для третього варіанта побудови виявлювача. Імовірність виявлення повітряних об'єктів на підставі результатів виявлення одиночних сигналів відповіді можливо записати в наступному вигляді:

$$D_3 = \sum_{i=0}^{N-K} C_N^i P_0^{N-1} (1-P_0)^i \sum_{l=0}^{N-K-i} C_{N-1}^l P_1^{N-l-i} (1-P_1)^l.$$

Імовірність виявлення траси повітряних об'єктів за одиночним сигналом відповіді

$$D_{33} = \sum_{i=0}^m C_m^i D_3^i (1-D_3)^{m-i}.$$

Імовірність виявлення траси повітряних об'єктів на виході виявлювача трас можна визначити з виразу

$$D_{333} = D_{33}^n.$$

Оцінимо вплив флукуаційних завад у каналі сигналів відповіді, коефіцієнта готовності літакового відповідача вторинних радіолокаційних систем спостереження та критерію виявлення траси на значення цифрового порога виявлення повітряних об'єктів запитальних радіолокаційних систем спостереження для пачки сигналів відповіді, що становить 25.

Представлені на рис. 1 – 3 залежності дозволяють проводити порівняльний аналіз існуючих і перспективних запитальних вторинних радіолокаційних систем спостереження за якістю виявлення трас повітряних об'єктів $D = f(K, P_0, k/m)$ при дії у каналі відповіді флукуаційних та імпульсних завад за логікою обробки k/m , що дорівнює 2/2 (рис. 1), 2/3 (рис. 2), 3/3 (рис. 3). При цьому червоним кольором позначено розрахунки для першого варіанту реалізації виявлювача траси повітряних об'єктів, зеленим – другого варіанту реалізації виявлювача траси повітряних об'єктів, синім – третього варіанту реалізації виявлювача траси повітряних об'єктів.

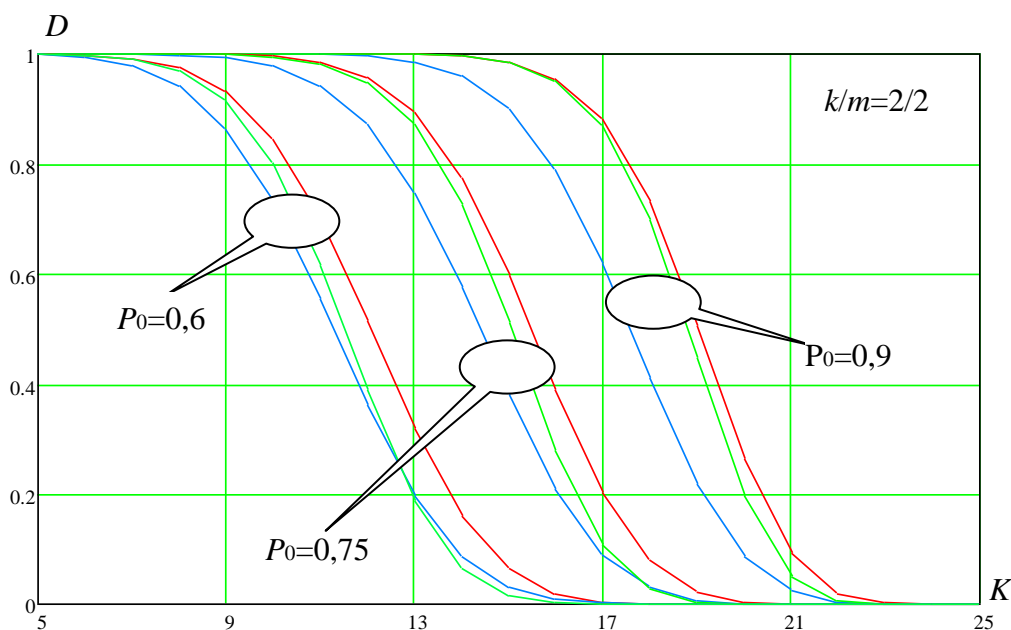


Рис. 1. Імовірність виявлення траси повітряного об'єкта при $k/m=2/2$

Представлені порівняльні характеристики якості виявлення трас повітряних об'єктів запитальними вторинними радіолокаційними системами спостереження показали, що перший варіант виявлювача кращий в порівнянні з іншими, розглянутими в роботі. Дійсно, така структура виявлювача трас повітряних об'єктів найменш чутлива до негативної дії коефіцієнта готовності відповідача запитальних радіолокаційних систем спостереження.

Слід зазначити, що у роботі розглянуто випадок однакового відношення сигнал-шум в каналах обробки радіолокаційних систем спостереження. На практиці ж, відношення сигнал-шум вторинних каналів спільної радіолокаційних систем спостереження значно перевищує цей показник відносно до первинного каналу.

Порівняльний аналіз рис. 1 – 3 дозволяє зробити наступні висновки:

- якість інформаційного забезпечення споживачів на підставі запропонованої структури вище в порівнянні зі структурою обробки інформації запитальних радіолокаційних систем, що використовується в даний час;
- якість інформаційного забезпечення споживачів має кращі показники при використанні методу обробки сигналів, заснованого на накопиченні і з наступним об'єднанням інформації запитальних радіолокаційних систем;
- коефіцієнт готовності літакових відповідачів істотно впливає на якість інформаційного забезпечення споживачів системи контролю повітряного простору.

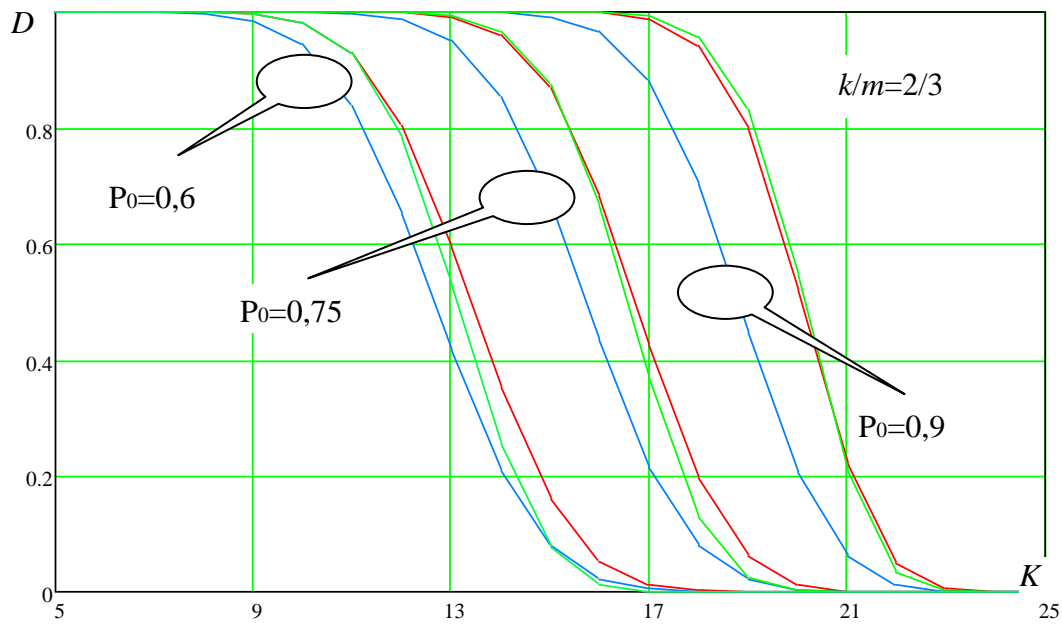


Рис. 2. Імовірність виявлення траєкторії повітряного об'єкта при $k/m=2/3$

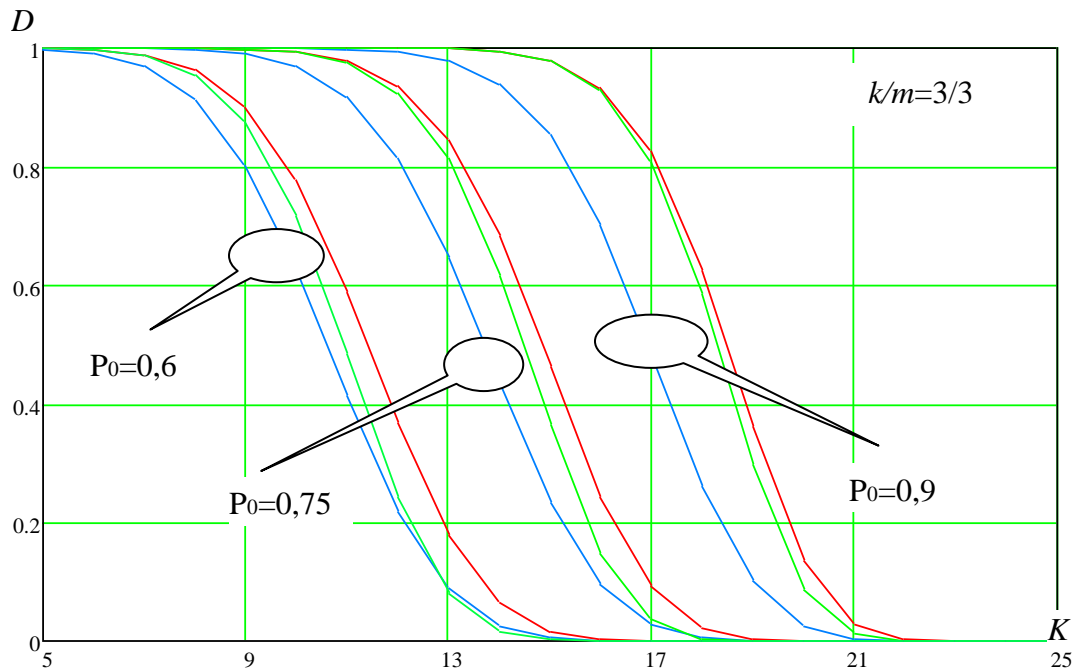


Рис. 3. Імовірність виявлення траєкторії повітряного об'єкта при $k/m=3/3$

Висновки

Проведено синтез та аналіз структури виявлювача траєкторій повітряних об'єктів запитальними радіолокаційними системами спостереження повітряного простору, що дозволило:

- провести порівняльний аналіз якості виявлення траєкторій повітряних об'єктів розглянутими конфігураціями структури виявлювача траєкторій повітряних об'єктів при різних послідовностях проведення операцій: виявлення сигналів відповіді, виявлення повітряного об'єкта та виявлення траєкторії повітряного об'єкта;

- підвищити якість інформаційного забезпечення споживачів системи контролю повітряного простору на підставі запропонованої структури в порівнянні зі структурою обробки інформації запитальних радіолокаційних систем, що використовується в даний час;

- показати, що якість інформаційного забезпечення споживачів має кращі показники при використанні методу обробки сигналів, заснованого на накопиченні і з наступним об'єднаням інформації запитальних радіолокаційних систем;
- оцінити вплив коефіцієнта готовності літакових відповідачів запитальних радіолокаційних систем на якість інформаційного забезпечення споживачів системи контролю повітряного простору.

Список літератури:

1. І. Свид, І. Обод. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою свій-чужий. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 253 с. doi: 10/30837/978-617-7988-76-1.
2. І. Обод, І. Свид, О. Мальцев. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору : навч. посібник. Харків : Друкарня Мадрид, 2021. 255 с.
3. J. Li, P. Stoica. MIMO Radar Signal Processing. Wiley-IEEE Press, 2008. 448 p.
4. Свид І. В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору: монографія. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 224 с.
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. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, V. Andrusevich, 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.
7. 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.
8. 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.
9. V. Semenets et al. Method of increasing the relative throughput of requesting radar systems // Przegląd Elektrotechniczny. 2022. Vol. 1, no. 11. pp. 99 – 103. doi: 10.15199/48.2022.11.17.
10. 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.
11. 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.
12. I. Obod, I. Svyd, O. Vorgul, O. Maltsev, O. Datsenko and N. Boiko. 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.
13. P. Švábeník, D. Zeman, R. Balada and Z. Fedra. Separation of secondary surveillance radar signals // 2011 34th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), Budapest, Hungary, 2011. pp. 487 – 490. doi: 10.1109/TSP.2011.6043683.
14. 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.
15. W. Konle. Separate processing of primary and secondary radar data in multi radar tracking // 2013 14th International Radar Symposium (IRS), Dresden, Germany, 2013. pp. 361.-366.
16. V. Semenets, I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev and M. Tkach. 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, vol 69. Springer, Cham, 2021. 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. Толлопа С.В., Дружинін В.А., Гордієвський О.Т. Розпізнавання групових об'єктів у багатопозиційних системах оперативного супроводження // Сучасний захист радіолокаційної інформації. 2012. № 1. С. 66 – 70.
19. Обод І.І., Стрельницький О.О. Інформаційна безпека інформаційної мережі систем спостереження повітряного простору // Системи обробки радіолокаційної інформації. 2015. № 9(134). С. 96 – 98.
20. Обод І.І., Стрельницький О.О. Захист радіолокаційної інформації в мережі систем спостереження повітряного простору // Системи обробки радіолокаційної інформації. 2016. № 2(139). С. 47 – 49.

21. 12. 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.
22. 18. 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.
23. Обод И.И., Булай А.Н., Луценко Ю.А. Оценка точности определения местоположения воздушных объектов в синхронных информационных сетях радиолокации // *Системы обработки радиолокационной информации*. 2006. № 9(58). С. 69 – 75.
24. Обод И.И., Булай А.Н., Луценко Ю.А. Оценка точности определения местоположения воздушных объектов в синхронных информационных сетях // *Системы обработки радиолокационной информации*. 2006. № 9(58). С. 69 – 71.
25. H. You, X. Jianjuan, G. Xin. Radar Data Processing with Applications // *Publishing House of Electronics Industry*, 2016. doi: 10.1002/9781118956878.
26. 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
27. Обод И.И., Стрельницький О.О., Андрусевич В.А. Методи підвищення якості інформаційного забезпечення системами спостереження повітряного простору // *Системы обработки радиолокационной информации*. 2014. № 4(120). С. 53 – 55.
28. Обод И.И., Шевцова В.В. Порівняльний аналіз запитальних систем передачі радиолокаційної інформації системи контролю повітряного простору // *36. наук. пр. Харк. нац. ун-ту Повітряних Сил*. 2013. № 1(34). С. 123 – 125.
29. Обод И.И. Обнаружение воздушных целей системой вторичной радиолокации // *Радиоэлектронні і комп'ютерні системи*. 2005. № 3. С.25 – 28.
30. І. Свид, В. Семенець, О. Мальцев, М. Ткач, С. Старокожев, О. Даценко, І. Шевцов. Порівняльний аналіз методів визначення координат повітряних об'єктів системами широкозонавої мультілатерації // *Радіотехніка*. 2022. Вип. 209. С. 162 – 177. doi: 10.30837/rt.2022.2.209.16.
31. 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*. June 1998. Vol. 45, no. 6, pp. 754 – 757. doi: 10.1109/82.686697.
32. Толюпа С.В., Дружинін В. А., Наконечний В.С., Цюпа Н.В., Батрак Є.О. Методи та алгоритми обробки радиолокаційної інформації у багатопозиційних системах зі змінною просторовою конфігурацією. Київ : Логос, 2014. 230 с.
33. М. Ткач, І. Свид, О. Воргуль, С. Старокожев, О. Мальцев, А. Глущенко. Оцінка відносної пропускної здатності запитальних систем спостереження повітряного простору // *Радіотехніка*. 2022. Вип. 208. С. 28 – 37. doi: 10.30837/rt.2022.1.208.03.
34. 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.
35. 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*. 1983. Vol. 130, no. 6, pp. 484 – 494.
36. M. K. Abdul-Hussein, O. Strelnytskyi, I. Obod, I. Svyd and H. Alrikabi, Evaluation of the Interference's Impact of Cooperative Surveillance Systems Signals Processing for Healthcare // *International Journal of Online and Biomedical Engineering (iJOE)*. 2022. Vol. 18, no 03, pp. 43 – 59. doi: 10.3991/ijoe.v18i03.28015.
37. 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.
38. V. Andrusевич and I. Obod. Assessment of the Quality of Information Support by Air Radar Surveillance Systems, *Advanced Information Systems*. 2021. Vol. 5, no. 2, pp. 78 – 82. doi: 10.20998/2522-9052.2021.2.10.
39. 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.
40. 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.
41. S. Starokozhev, M. Tkach, A. Hlushchenko, O. Datsenko, M. Chernyshov and V. Chumak. 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.
42. S. Starokozhev, M. Tkach, A. Hlushchenko, O. Datsenko, M. Chernyshov and V. Chumak. 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.

43. Свид І.В., Ткач М.Г., Обод І.І. Порівняльний аналіз заводо захищеності радіолокаційних систем ідентифікації свій-чужий // Радіотехніка. 2022. Вип. 211. С. 101 – 113. doi: 10.30837/rt.2022.4.211.08.

44. І. Свид, М.Ткач, А.Серіков, О. Коротіч, С. Дацько, Д. Сухоруков, Т. Мачоніс. Обробка інформації мереж радіолокаційних систем спостереження повітряного простору // Радіотехніка. 2022. Вип. 210. С. 137 – 145. doi: 10.30837/rt.2022.3.210.11.

45. Ткач М.Г. Оцінка відносної пропускної здатності літакових відповідачів вторинних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору // Радіотехніка. 2021. Вип. 207. С. 123 – 131. doi: 10.30837/rt.2022.3.210.11.

46. І. Свид, І. Воргуль, С. Старокожев, М. Ткач, О. Мальцев, І. Шевцов. Порівняльний аналіз заводостійкості каналу передачі інформації вторинних радіолокаційних систем // Радіотехніка. 2022. Вип. 208. С. 44 – 54. doi: 10.30837/rt.2022.1.208.05.

Надійшла до редколегії 28.02.2023

Відомості про авторів:

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

Ткач Марія Геннадіївна – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: mariia.zavorotna@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4248-7633>