

*І.В. СВИД, канд. техн. наук, М.Г. ТКАЧ, А.О. СЕРІКОВ, О.В. КОРОТІЧ,
С.В. ДАЦЬКО, Д.О. СУХОРУКОВ, Т.С. МАЧОНІС*

ОБРОБКА ІНФОРМАЦІЇ МЕРЕЖ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Вступ

До основних джерел інформації про повітряну обстановку у системі контролю повітряного простору відносяться оглядові первинні радіолокатори [1, 2], вторинні радіолокаційні системи [3 – 7] та системи ідентифікації за ознакою «свій-чужий» (Identification Friend or Foe (IFF)) [8 – 12]. В свою чергу первинні радіолокаційні системи в залежності від територіального розташування передавача та приймача діляться на однопозиційні та багатопозиційні [13 – 18]. При цьому слід зазначити, що аналіз інформаційної безпеки однопозиційних радіолокаторів [15, 16] показує їх вразливість як широкому спектрі ненавмисних та навмисних завад, так і визначенні їх місця розташування. Це обумовлено простотою як виявлення випромінюючого передавача зондувального сигналу в однопозиційних радіолокаторах, так і оцінки його координат. Природно це зумовило основний недолік однопозиційних радіолокаторів – низька стійкість до завад та живучість. Перехід до мережі радіолокаційних систем дозволяє значно послабити вплив навмисно спрямованих завад [17 – 19] на пункти прийому багатопозиційної мережі, у зв'язку з неможливістю оцінити їх координати. Це дозволяє стверджувати, що мережі радіолокаційних систем мають більш високу стійкість до навмисних та внутрісистемних завад у порівнянні з однопозиційними радіолокаційними системами [20 – 22].

Для підвищення якості інформаційного забезпечення споживачів інформація мережі радіолокаційних систем обробляються [23]. При цьому обробка радіолокаційної інформації може здійснюватися як на сигнальному рівні [24 – 26], так і на рівнях як первинної [27], так і вторинної [28] обробки інформації. Це визначає складність здійснення міжетапної оптимізації обробки інформації як в однопозиційних радіолокаторах, так і у мережах радіолокаційних систем [29] спостереження повітряного простору.

Можна стверджувати, що у відомих роботах [26 – 29], зокрема, проведено систематичне введення в теорію, розробку та подано результати досліджень технології обробки інформації в радіолокаційних мережах систем спостереження повітряного простору. Розглянуто як класичну теорію, так і методи обробки радіолокаційної інформації на наведених вище етапах обробки інформації радіолокаційних систем. Представлена технологія обробки радіолокаційної інформації доцільна як в управлінні повітряним рухом, так і в системі протиповітряної оборони. Названі системи описуються схожими алгоритмами обробки радіолокаційної інформації, і, в цілому, мають загальні математичні основи.

Також у [29] розглянуто різні аспекти оптимальної обробки як сигнальних даних, так й інформації. При цьому показано, що розглянутий підхід оптимізації обробки як сигналів, так і радіолокаційної інформації дозволяє суттєво покращити характеристики, порівняно з існуючим підходом до обробки радіолокаційних даних. При цьому слід зазначити, що деякі алгоритми оптимізації обробки радіолокаційних сигналів дозволяють прогнозувати продуктивність вже на етапі проєктування, а також служать для об'єднання інформації для багатопільового відстеження з використанням розподіленої архітектури відстеження.

У роботах [24, 28] показано, що при виконуваних процедурах на етапах обробки інформації систем радіолокаційного спостереження оптимізація, як виявлення, так і вимірювання координат повітряних об'єктів, можлива тільки при розподіленій обробці інформації у мережах спостереження. При цьому значення аналогового порогу для виявлення сигналу використовується і у якості параметру при спільній оптимізації обробки радіолокаційних інформації.

Метою запропонованої роботи є синтез та аналіз оптимальної структури міжетапної обробки сигнальних даних та радіолокаційної інформації первинної обробки в мережі радіолокаційних систем спостереження повітряного простору.

Загальна характеристика структури міжетапної обробки інформації в мережах радіолокаційних систем спостереження повітряного простору

Обробка інформації мережі радіолокаційних систем – це приведення інформації, отриманої на пунктах прийому ехосигналів, у вигляд, придатний для використання споживачами. Слід зазначити, що обробка інформації, зокрема інформації мережі радіолокаційних систем, та поєднання інформації мережі радіолокаційних систем спостереження виконується за допомогою сучасних інформаційних технологій. Саме інформаційні технології дозволяють реалізувати автоматичний збір, обробку, зберігання, передачу та видачу радіолокаційної інформації користувачам, підвищуючи при цьому практично всі показники якості інформації мережі радіолокаційних систем.

Складність структури системи обробки інформації мережі радіолокаційних систем не дозволяє проводити формалізацію та аналіз її роботи загалом. У зв'язку з цим всю структуру обробки інформації мережі радіолокаційних систем необхідно розділили на кілька частин, що є функціонально цілісними [14, 28]. Однак слід зазначити, що послідовна процедура обробки інформації мережі радіолокаційних систем ускладнює проведення міжетапної оптимізації обробки інформації, що призводить до зниження якості виявлення повітряного об'єкта [29, 30] та оцінки його координат [31, 32].

В мережах радіолокаційних систем обробка радіолокаційної інформації поділяється, як правило, на чотири етапи:

- обробка сигнальної інформації, яка полягає у виявленні сигналів, що приймаються, і оцінці їх параметрів;

- первинна обробка даних, що полягає у виявленні повітряного об'єкта та вимірі його координат з відповідними якістю та похибками. Цей процес складається з кількох етапів, до яких можна віднести: виявлення пакета сигналів, що приймаються; формування повного пакету сигналів, що приймаються; визначення дальності до повітряного об'єкта та оцінка його азимуту. Всі ці інформаційні задачі реалізуються з використанням оптимальних алгоритмів, що ґрунтуються на критеріях мінімуму помилок прийняття рішення та результатів вимірювання;

- вторинна обробка інформації передбачає визначення параметрів траєкторії кожного виявленого повітряного об'єкта за сигналами однієї чи кількох позицій мережі радіолокаційних систем, включаючи операції ототожнення позначок повітряного об'єкта;

- третинна обробка інформації полягає у поєднанні параметрів траєкторій повітряного об'єкта, отриманих різними приймальними пунктами мережі радіолокаційних систем з ототожненням траєкторій.

Зміст кожного із зазначених вище етапів свідчить про їхню важливість та необхідність для створення повної картини повітряної обстановки в зоні відповідальності.

При цьому слід зазначити, що поточний вектор стану повітряного об'єкта з відповідною матрицею точності вимірювання координат повітряного об'єкта складається після закінчення первинної обробки інформації.

Для виконання задач первинної обробки радіолокаційної інформації з приймальних пунктів мережі радіолокаційних систем поступають сигнальні дані, які несуть інформацію про виявлення сигналів, що приймаються, тобто $x_i = 1$, коли в елементі часового розділення відбулося перевищення порога виявлення; у випадку коли не відбулося перевищення порога виявлення, то $x_i = 0$.

Таким чином, для першого етапу сигнальної обробки інформації частковими показниками якості обробки інформації буде імовірність правильного виявлення приймаємих сигналів D_s , яка може бути визначена виходячи з співвідношення

$$D_s = f[q_s, F_s = f(z_s) = const], \quad (1)$$

де q_s – відношення сигнал/шум сигналу, що приймається, F_s – імовірність хибної тривоги виявлення сигналу, що приймається, z_s – поріг виявлення сигналу.

Оптимальність рішення задачі виявлення сигналів приймається, як правило, на основі критерію Неймана – Пірсона [33], який зводиться до максимізації імовірності правильного виявлення сигналів при обмеженні на імовірність хибного виявлення. Ці дві зазначені імовірності є показниками якості виявлення сигналів. Операції оцінки параметрів сигналів в загальному випадку оптимізуються, як правило, за критерієм мінімуму середнього ризику.

Для первинної обробки інформації мережі радіолокаційних систем показником якості обробки інформації є імовірність правильного виявлення повітряного об'єкта $P = D_1$ при фіксованій імовірності хибної тривоги, котру можливо оцінити з співвідношення

$$D_1 = f[N, C, F_1 = f(N, C, z_s) = const], \quad (2)$$

де N – пачка прийнятих сигнальних даних, C – цифровий поріг виявлення повітряного об'єкта.

Рішення про виявлення повітряного об'єкта з показниками якості F_1 та D_1 поступає на вимірювач координат повітряного об'єкта. Оцінка координат миттєвого положення повітряного об'єкта виконується одночасно з виявленням повітряного об'єкта. Основне завдання вимірювача координат повітряного об'єкта полягає у тому, щоб на основі аналізу отриманої послідовності нулів та одиниць оцінити оптимальним чином дальність та азимут повітряного об'єкта.

Наведений опис щодо виявлення сигналів та повітряного об'єкта в мережі радіолокаційних систем наочно показує, що етапна реалізація обробки інформації з одного боку спростила проведення оптимізації обробки всередині кожного етапу обробки, проте з іншого боку ускладнила проведення сумісної оптимізації як виявлення повітряного об'єкта, так і вимірювання координат повітряного об'єкта. Дійсно, стабілізація імовірності хибного виявлення повітряного об'єкта повинна здійснюватися аналоговим порогом виявлення сигналу, що складно забезпечити у прийнятій на практиці системі обробки інформації.

Синтез оптимальної структури обробки інформації в мережі радіолокаційних систем спостереження повітряного простору

Для підвищення якості інформаційного забезпечення споживачів мережа радіолокаційних систем потребує проведення обробки інформації на всіх етапах. Будемо враховувати, що мережа радіолокаційних систем складається з R приймальних пунктів, кожний з яких має M елементів дозволу щодо дальності. За такої постановки питання спільна оптимальна обробка інформації мережі радіолокаційних систем може здійснюватися у двох варіантах:

- при поєднанні рішень на рівні виявлення сигналів мережі радіолокаційних систем;
- при поєднанні рішень на рівні виявлення повітряного об'єкта.

Синтезуємо та здійснимо аналіз синтезованої структури оптимальної обробки інформації мережі радіолокаційних систем при вказаних вище варіантах поєднання інформації. При такій постановці питання у нас є сигнальні дані, які потупають від мережі радіолокаційних систем за N послідовних періодів повторення зондуючого сигналу.

Завдання виявлювача повітряного об'єкта полягає в тому, щоб на основі аналізу вхідної послідовності нулів та одиниць прийняти рішення (оптимальним чином) про наявність або відсутність повітряного об'єкта у прийнятій послідовності.

На приймальних пунктах мережі радіолокаційних систем прийняті сигнали після оптимальної лінійної обробки та детектування порівнюються у пороговому пристрої з величиною порогу, який визначає імовірність виявлення приймаємих сигналів. Після порогового пристрою на подальшу обробку поступають рішення, тобто сигнальні дані. Це дозволяє стверджувати, що з приймальних пунктів мережі радіолокаційних систем споживачу надається сукупність сигнальної інформації x_i , з показниками якості виявлення, які визначаються пороговою напругою, а також відношенням сигнал/шум приймаємої реалізації (1).

В цьому разі спостерігач має R , матрицю сигнальної інформації $\vec{X} = \|x_{ij}\|$, де $\|x_{ij}\| = 1$, коли в елементі часового розділення $i = (\overline{1, M})$, $j = (\overline{1, N})$, який відповідає просторовому дозволу, що розглядається, відбулося перевищення порога; коли ж не відбулося то $x_{ij} = 0$.

Таким чином, для рішення задачі виявлення необхідно отримати відношення правдоподібності та порівняти його з аналоговим порогом, обраним у відповідності до допустимої імовірності хибної тривоги виявлення повітряного об'єкта. Функції правдоподібності для гіпотез H_1 (наявності сигналу) та H_0 (відсутності сигналу) при цьому можливо записати в наступному вигляді:

$$L(x_i | H_1) = \prod_{i=1}^N P_{sp}^{x_i}(x_i) [1 - P_{sp}(x_i)]^{1-x_i}, \quad (3)$$

$$L(x_i | H_0) = \prod_{i=1}^N P_p^{x_i}(x_i) [1 - P_p(x_i)]^{1-x_i}, \quad (4)$$

де x_i – об'єднана послідовність нулів та одиниць з виходів приймальних пунктів мережі радіолокаційних систем.

Використовуючи вирази (3) та (4), відношення правдоподібності можна записати у вигляді

$$l(x_i) = \frac{L(x_i | H_1)}{L(x_i | H_0)} = \prod_{i=1}^N \left(\frac{P_{sp}(x_i)}{P_p(x_i)} \right)^{x_i} \left[\frac{1 - P_{sp}(x_i)}{1 - P_p(x_i)} \right]^{1-x_i} \geq l_0. \quad (5)$$

Здійснивши логарифмування виразу (5) та перетворивши даний вираз, отримуємо:

$$\sum_{i=1}^N x_i \eta_i \geq C, \quad (6)$$

де $\eta_i = \ln \frac{P_{sp}(x_i)[1 - P_{sp}(x_i)]}{P_p(x_i)[1 - P_p(x_i)]}$, $C = \ln l_0 - \sum_{i=1}^N \ln \frac{1 - P_{sp}(x_i)}{1 - P_p(x_i)}$.

Таким чином, алгоритм оптимального виявлення повітряного об'єкта (6) в мережі радіолокаційних систем зводиться до сумування вагових коефіцієнтів η_i , які визначаються формами діаграм направленості антен приймальних пунктів мережі радіолокаційних систем, що відповідають позиціям пачки, де $x_i = 1$:

Виходячи з викладеного, можна стверджувати, що для прийняття рішення про виявлення повітряного об'єкта, при сумісній обробці на рівні сигнальної інформації, обробці належить сукупність нулів та одиниць x_{ij} . У цьому випадку можна зробити висновок, що x_{ij} – це випадкова величина, яка відповідає розподілу Бернуллі:

$$P(x_{ij}) = P_{ijr}^{x_{ij}} (1 - P_{ijr})^{1-x_{ij}},$$

де P_{ij} – імовірність перевищення порога в i -м часовому каналі обробки інформації.

При відсутності сигналу $P_{ij} = F_{rj}$ це імовірність хибної тривоги, а при дії сигналу $P_{ij} = D_{ij}$ – імовірність виявлення сигналу.

Будемо враховувати, що на вхід пристрою сумісної обробки усього масиву попередніх рішень поступає сукупність всіх можливих комбінацій x_{ij} як при відсутності, так и при наявності сигналу (гіпотези приведених вище випадкових величин x_{ij}).

Сумісні розподіли імовірності (H_0 та H_1), тобто $P(x_{ij}|H_0)$ та $P(x_{ij}|H_1)$ довільні, однак відомі. Для будь-якої конкретної сукупності x_{ij} можна сформулювати наступне відношення правдоподібності:

$$\Lambda = P(x_{ij}|H_1)/P(x_{ij}|H_0). \quad (7)$$

Таким чином, порівняння Λ з порогом, який визначається допустимою імовірністю хибної тривоги, забезпечує оптимальне, за критерієм Неймана – Пірсона, рішення про наявність чи відсутність сигналу приймається x_{ij} .

У зв'язку з тим, що шуми в каналах часової обробки незалежні, то можна записати:

$$P(x_{ij}|H_0) = \prod_{j=1, i=1}^{N, M} P(x_{ij}|H_0) = \prod_{j=1, i=1}^{N, M} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (8)$$

При дії сигналу щодо перевищення порогів у всіх каналах обробки інформації можливо враховувати незалежними подіями. В цьому випадку вираз (8) можемо записати в вигляді

$$P(x_{ij}|H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{M, N} P(x_{ij}|H_1) = \prod_{i=1, j=1}^{M, N} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}}. \quad (9)$$

Враховуючи вирази (8) и (9), вираз (7) можна записати так:

$$\Lambda = \frac{\prod_{i=1, j=1}^{M, N} D_{ij}^{x_{ij}} (1 - D_{ij})^{1-x_{ij}}}{\prod_{i=1, j=1}^{M, N} F_{ij}^{x_{ij}} (1 - F_{ij})^{1-x_{ij}}}. \quad (10)$$

Після логарифмування виразу (10) отримуємо:

$$L = \ln \Lambda = \sum_{i=1, j=1}^{M, N} x_{ij} (\ln D_{ij} - \ln F_{ij}) + (1 - x_{ij}) [(1 - \ln D_{ij}) - (1 - \ln F_{ij})].$$

Позначимо множники при x_{ij} :

$$Q_{ij} = \ln D_{ij} - \ln F_{ij} - \ln(1 - D_{ij}) + \ln(1 - F_{ij}) = \ln \left(\frac{D_{ij}(1 - F_{ij})}{(1 - D_{ij})F_{ij}} \right).$$

В цьому випадку, коли відкинуті складові, які не залежать від x_{ij} , то отримуємо оптимальний, за критерієм Неймана – Пірсона, алгоритм виявлення повітряного об'єкта при поєднанні попередніх рішень всіх часових та просторових каналів обробки інформації:

$$L = \sum_{i=1, j=1}^{M, N} Q_{ij} x_{ij} \underset{>}{\leq} k, \quad (11)$$

де k – цифровий поріг, який визначається імовірністю хибного виявлення повітряного об'єкта.

Алгоритм (11) отриманий для випадку, коли поєднання інформації здійснюється на рівні виявлення сигналів.

Для випадку поєднання інформації на рівні виявлення повітряних об'єктів алгоритм можна записати так:

$$L_1 = \sum_{j=1}^M Q_{ir} x_{ir} + \sum_{i=1}^N Q_i x_i \leq C. \quad (12)$$

В розглядаємих варіантах обробки інформації імовірність виявлення повітряного об'єкта оптимізується за рахунок сумісної оптимізації виявлення сигналів та виявлення повітряного об'єкта. Таким чином, для реалізації запропонованого алгоритму повинна бути створена інформаційна база зберігання радіолокаційної інформації на потрібну кількість зондування передатчика мережі радіолокаційних систем, в кожному елементі якої повинні зберігатися сигнальні дані з показниками якості їх отримання.

На основі виразів (11) та (12) можливо розрахувати імовірності виявлення повітряного об'єкта для різних значень відповідних величин та відповідного вирішального правила, тобто оцінити два варіанта оптимізації обробки інформації в мережі радіолокаційних систем.

Аналіз якості обробки та поєднання даних в мережах радіолокаційних системах спостереження повітряного простору

На рис. 1 представлені залежності імовірності виявлення повітряного об'єкта $D = f(q, k/m, N = 25)$ для способу попереднього поєднання результатів виявлення сигналів, а на рис. 2 – для способу попереднього поєднання результатів виявлення повітряного об'єкта при фіксованій імовірності хибної тривоги виявлення повітряного об'єкта.

Представлені залежності отримані при пачці сигналів, що приймаються $N = 25$, цифровому порозі прийняття рішення об виявленні повітряного об'єкта $C = 12$ при загальному числі приймальних пунктів мережі радіолокаційних систем що дорівнює $m = 4$ і для різних логік прийняття рішення про виявлення повітряного об'єкта k/m . Порівняльний аналіз рис. 1 показує, що найбільш оптимальна логіка прийняття рішення для метода попереднього поєднання результатів виявлення сигналів реалізується при $k/m = 2/4$, а найгірша – при $k/m = 4/4$. Порівняльний аналіз імовірності виявлення повітряного об'єкта при $q = 1,52$ показує, що для логіки прийняття рішення $k/m = 4/4; 3/4; 2/4; 1/4$ імовірність виявлення повітряного об'єкта складає 0,4; 0,81; 0,91; 0,78 відповідно.

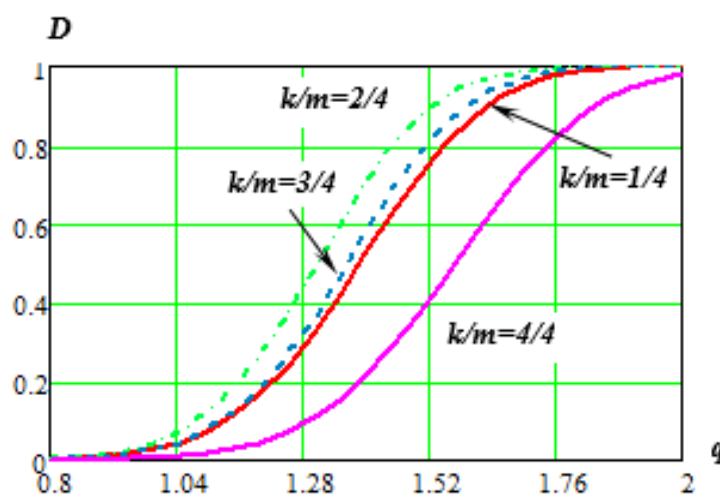


Рис. 1. Імовірність виявлення повітряного об'єкта для способу попереднього поєднання результатів виявлення сигналів

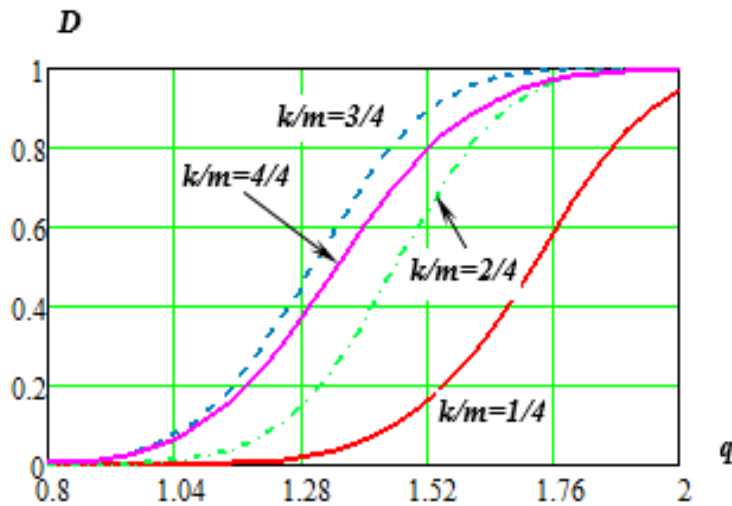


Рис. 2. Імовірність виявлення повітряного об'єкта для способу попереднього поєднання результатів виявлення повітряного об'єкта

Порівняльний аналіз рис. 2 показує, що найбільш оптимальна логіка прийняття рішення при попередньому поєднанні результатів виявлення повітряного об'єкта реалізується при $k/m=3/4$, а найгірша – при $k/m=1/4$. Порівняльний аналіз імовірності виявлення повітряного об'єкта при $q=1,52$ показує, що для логік прийняття рішення $k/m=4/4; 3/4; 2/4; 1/4$ імовірність виявлення повітряного об'єкта складає 0,8; 0,91; 0,62; 0,18 відповідно.

Аналіз рис. 1 та 2 дозволяє провести порівняльний аналіз двох методів поєднання інформації в мережі радіолокаційних систем.

Висновки

Синтезована структура обробки радіолокаційної інформації мережі радіолокаційних систем спостереження повітряного простору, яка дозволила здійснити міжетапну оптимізацію обробки як сигнальних даних, так й інформації первинної обробки.

Слід зазначити, що синтезована структура сумісної оптимальної обробки як сигнальних даних мережі радіолокаційних систем, так й інформації первинної обробки дозволила реалізувати два способи обробки інформації. Наведені розрахунки показали, що для способів обробки інформації, при якому поєднання інформації здійснюється на рівні прийняття рішень про виявлення повітряних об'єктів в кожному каналі обробки сигнальних даних, має деякі переваги в якості обробки інформації мережі радіолокаційних систем у порівнянні з варіантом поєднання інформації на етапі обробки сигналів, який використовується в теперішній час. Однак для способу поєднання інформації на рівні прийняття рішень про виявлення повітряних об'єктів потік передаваної інформації на пункт сумісної обробки значно зменшується. Все це дозволяє підвищити якість обробки інформації в системі контролю повітряного простору.

Список літератури:

1. 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.
2. I. Svyd, I. Obod, O. Maltsev, V. Andrushevich, 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.
3. 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.
4. 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 Confer-

- ence on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), 2020, pp. 721-726. doi: 10.1109/PICST51311.2020.9467955.
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 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.
7. 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.
8. І. Свид, І. Обод. Завадостійкість радіолокаційних систем ідентифікації за ознакою «свій-чужий». Харків : Мадрид, 2021. С. 253. doi: 10/30837/978-617-7988-76-1.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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, pp. 105-125, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-71892-3_5.
13. 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.
14. Тольюпа 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. Обод І.І., Стрельницький О.О. Захист інформації в мережі систем спостереження повітряного простору // Системи обробки інформації. 2016. № 2(139). С. 47-49.
17. 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.
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.
19. 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.
20. 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.
21. H. You, X. Jianjuan, G. Xin. Radar Data Processing with Applications // Publishing House of Electronics Industry. 2016. doi: 10.1002/9781118956878.
22. 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
23. 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.
24. Обод І.І., Шевцова В.В. Порівняльний аналіз запитальних систем передачі інформації системи контролю повітряного простору // Зб. наук. праць Харків. нац. ун-ту Повітряних Сил. 2013. № 1(34). С. 123-125.
25. І. Обод, І. Свид, О. Мальцев. Обробка даних радіолокаційних систем спостереження повітряного простору : навч. посібник. Харків : Мадрид, 2021. 255 с.
26. J. Li, P. Stoica. MIMO Radar Signal Processing. Wiley-IEEE Press, 2008. 448 p.
27. 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.

28. Толлопа С.В., Дружинін В. А., Наконечний В.С., Цюпа Н.В., Батрак Є.О. Методи та алгоритми обробки радіолокаційної інформації у багатопозиційних системах зі змінною просторовою конфігурацією. Київ : Логос, 2014. 230 с.
29. Обод І.І. Обнаружение воздушных целей системой вторичной радиолокации // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. 2005. № 3. С.25-28.
30. 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.
31. Conte E., Daddio E., Farina A., and Longo M. Multistatic radar detection – Synthesis and comparison of optimum and suboptimum receivers // IEEE Proceedings F: Communications Radar and Signal Processing. 1983. vol. 130, no. 6, pp. 484-494.
32. 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.
33. 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.
34. I. Obod. Integrated Coordinate-and-Time Support for the Address Inquiry in the Secondary Radar Systems // Telecommunications and Radio Engineering, vol. 53, no. 3, pp. 54-56, 1999. doi: 10.1615/telecomradeng.v53.i3.100.
35. 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.
36. 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.
37. І.І. Обод, В.В. Шевцова. Пропускна спроможність відповідачів запитальних систем передачі польотної інформації // Системи обробки інформації. 2013. № 1(108). С. 105-108.

Надійшла до редколегії 30.08.2022

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: maria.zavorotna@nure.ua; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4248-7633>

Серіков Антон Олександрович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: anton.sierikov1@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-2008>

Коротіч Олексій Віталійович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: oleksii.korotich@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7213-6666>

Дацько Сергій Валерійович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: serhii.datsko@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2524-8702>

Сухоруков Дмитро Олексійович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: dmytrosukhorukov10@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5772-286X>

Мачоніс Тадас Сігітасович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: machonis7@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7656-2948>