

**РОЗПОДІЛЕНА ОБРОБКА РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ
СИСТЕМ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ****Вступ**

До основних джерел радіолокаційної інформації про повітряну обстановку у системі контролю повітряного простору відносяться первинні оглядові 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 спектру 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 радіолокаційна інформація мережі радіолокаційних систем обробляється [23]. При цьому обробка радіолокаційної інформації може здійснюватися на сигнальному рівні [24 – 26] і на рівнях первинної [27] та вторинної [28] обробки радіолокаційної інформації.

Можна стверджувати, що у відомих роботах [29 – 32], зокрема, проведено систематичне введення в теорію, розробку та подано результати досліджень технології обробки інформації в радіолокаційних мережах систем спостереження повітряного простору. Розглянуто класичну теорію 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 [33 – 36] розглянуто різні аспекти оптимальної обробки сигнальних даних та інформації. Показано, що підхід оптимізації обробки як сигналів, так і радіолокаційної інформації дозволяє істотно покращити характеристики в порівнянні з існуючим підходом до обробки радіолокаційних даних. Слід зазначити, що деякі алгоритми оптимізації обробки радіолокаційних сигналів дозволяють прогнозувати продуктивність вже на етапі проектування, а також служать для об'єднання інформації для багатопільового відстеження з використанням розподіленої архітектури відстеження [37 – 41].

У роботах [24, 28] показано, що при виконуваних процедурах на етапах обробки інформації систем радіолокаційного спостереження оптимізація виявлення 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 інформацій.

Метою роботи є аналіз якості об'єднання оцінок виявлення радіолокаційних сигналів та повітряних об'єктів при реалізації розподіленої обробки радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору.

Оцінка якості виявлення повітряних об'єктів при розподіленій обробці радіолокаційної інформації

Як показано вище, основу інформаційного забезпечення споживачів становлять спільні або суміщені радіолокаційні системи спостереження. Однак така побудова радіолокаційної системи спостереження повітряного простору не завжди використовується для підвищення якості інформаційного забезпечення споживачів. Дійсно, виходячи з існуючих структур інформаційного забезпечення споживачів, вторинні радіолокаційні системи спостереження використовуються тільки для отримання бортової інформації ПО. Однак можна відзначити, що в окремих випадках, наприклад при вимірюванні дальності, до ПО використовують інформацію первинних РЛС, а азимута – інформацію запитальних радіолокаційних систем спостереження. Це підвищує якість інформаційного обслуговування споживачів.

В існуючих радіолокаційних систем спостереження повітряного простору споживачам видається оцінка вектору вимірювання $\hat{\alpha}$, котра характеризується кореляційною матрицею помилок \bar{C}^{-1} , отриманою за результатами вимірювання координат ПО первинним радіолокатором. Інформація вторинних радіолокаційних систем спостереження використовується для отримання бортової інформації від ПО, яка також передається споживачеві. Слід зазначити, що для об'єднання оцінки вектору вимірювань ПО, отриманої первинними радіолокаційними системами спостереження, і польотної інформації, отриманої вторинними радіолокаційними системами спостереження, на запитальних радіолокаційних системах спостереження здійснюються всі ті процедури виявлення і вимірювання, що і на первинній радіолокаційній системі спостереження. Це може бути враховано при обробці радіолокаційної інформації, що призведе до підвищення якості радіолокаційної інформації, яка видається споживачам. Покажемо це.

Структуру первинної обробки радіолокаційної інформації в спільних та суміщених радіолокаційних системах спостереження можна представити у вигляді двоканальної структури, яка формує об'єднану радіолокаційну інформацію споживачам на основі вагового об'єднання результатів каналного виявлення і оцінок векторів каналних вимірювань ПО з одночасним включенням до складу інформаційного блоку і польотної інформації, отриманої за каналами запитальних радіолокаційних систем спостереження.

Отримані в кожному з каналів оцінки векторів вимірювання спільно з кореляційними матрицями помилок вимірювання надходять на пристрій об'єднання оцінок. У пристрої об'єднання оцінок на основі аналізу надходять оцінки векторів вимірювання та кореляційних матриць помилок вимірювання, обчислюються оцінка результуючого вектору вимірювань і результуюча кореляційна матриця помилок. Результуючий вектор виміру $\hat{\alpha}_p$ спільно з результуючою кореляційною матрицею помилок \bar{C}_p^{-1} видаються споживачам.

Будемо враховувати, що одночасно виробляється оцінка вектору вимірювання $\vec{\alpha}$ в M каналах радіолокаційної обробки сигналів. Якщо задатися нормальним законом розподілу кожної з складових вектору $\vec{\alpha}$, а також врахувати некорельованість вимірювань в каналах обробки, то логарифм відношення правдоподібності з точністю до постійної величини можна записати як

$$\ln l = \sum_{k=1}^M \ln l_k = \sum_{k=1}^M \left[-\frac{1}{2} (\vec{\alpha}_k - \hat{\alpha}_k)^T \bar{C}_k (\vec{\alpha}_k - \hat{\alpha}_k) \right], \quad (1)$$

де $\hat{\alpha}_k$ та \bar{C}_k – оцінки та матриця точності оцінювання за сигналами кожної з радіолокаційних систем спостережень.

Легко показати, що вираз (1) з точністю до постійної величини можливо привести до вигляду

$$\ln l = -\frac{1}{2}(\bar{\alpha} - \hat{\alpha}_p)^T \bar{C}_p (\bar{\alpha} - \hat{\alpha}_p),$$

де $\hat{\alpha}_p$ – результуюча оцінка, \bar{C}_p – результуюча матриця точності, що визначаються з наступних виразів:

$$\hat{\alpha}_p = \bar{C}_p^{-1} \sum_{k=1}^M \bar{C}_k \bar{\alpha}_k, \quad \bar{C}_p = \sum_{k=1}^M \bar{C}_k. \quad (2)$$

Таким чином, на підставі виразу (2) можлива оцінка результуючого вектору вимірювання та результуючої матриці точності, а, отже, і результуючої кореляційної матриці похибок вимірювання при спільному використанні результатів вимірювання первинного та вторинного радіолокаторів.

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

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) можна записати так:

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

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

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

Слід зазначити, що характерною особливістю вирішального пристрою виявлення ПО в спільній або суміщеній радіолокаційних системах спостереження є наявність двох порогів. Перший поріг встановлюється в порогових пристроях виявлювача сигналів кожного з каналів спільної радіолокаційної системи спостереження. Цей поріг аналоговий, і за допомогою тільки його можна змінювати умовну імовірність хибної тривоги на виході спільного виявлювача ПО. Другий поріг встановлюється в пороговому пристрої спільного виявлювача ПО і є порогом виявлення ПО. Він може бути тільки дискретним.

Проведемо оцінку характеристик виявлення ПО при спільному використанні сигналів первинного та вторинного каналів суміщеної радіолокаційної системи спостереження повітряного простору. Зазначимо, що об'єднання каналних рішень про виявлення повітряних об'єктів може здійснюватися на етапах:

- виявлення радіолокаційних сигналів;
- виявлення ПО.

Крім того, слід зауважити, що вибір вирішального правила при спільному виявленні сигналів суміщених радіолокаційних систем спостереження, як правило, повинен визначатися не тільки вимогами найкращого виявлення сигналів в таких системах. Дійсно, як зазначено вище, при виявленні ПО повинна бути проведена ідентифікація ПО. Це передбачає посилення вирішального правила, хоча при цьому результуючі характеристики виявлення можуть

погіршуватися. Жорсткість вирішального правила потрібна і при використанні сигналів спільних радіолокаційних систем спостереження для точного визначення координат ПО.

Проведемо порівняльний аналіз варіантів об'єднання рішень виявлення ПО.

Для першого варіанту бінарно-квантованої послідовності імпульсів з виходу детектора сигнали в кожному з каналів суміщених радіолокаційних систем спостереження надходять на виявлювач ПО. Результати каналних виявлень сигналів об'єднуються відповідно до правил «1 з 2» або «2 з 2» і далі об'єднана послідовність імпульсів надходить на виявлювач ПО. Завдання виявлювача ПО полягає в тому, щоб на основі аналізу надходження послідовності нулів та одиниць прийняти оптимальне рішення про наявність або відсутність ПО в прийнятій послідовності. Слід зазначити, що для вирішення завдання виявлення необхідно отримати відношення правдоподібності і порівняти його з порогом, обраним відповідно до допустимої імовірності хибної тривоги виявлення ПО.

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

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

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

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

де

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

Таким чином, алгоритм оптимального виявлення ПО (6) зводиться до підсумовування вагових коефіцієнтів η_i , що визначаються формами діаграм спрямованості антен відповідного каналу суміщених радіолокаційних систем спостереження, відповідних позиціям пачки, де $x_i = 1$.

Як зазначено вище, у запитальних РСС у якості сигналів запиту і відповіді використовуються інтервально-часові коди (ІЧК). Оскільки для запитальних РСС характерно високе відношення сигнал-шум, то є можливість досягнення необхідних показників якості при обробці одиночних імпульсів ІЧК. Обробка прийнятих сигналів приймачем, при такій постановці розглянутого питання, полягає в декодуванні прийнятого сигналу й за його результатом – в прийнятті відповідного рішення.

Для підвищення імовірності прийнятого рішення при обробці кодованих сигналів, а також для захисту запитальних РСС від внутрішньо-системних завад у приймачі розглянутої системи можуть бути використані різні способи обробки сигналів, зокрема способи, що здійснюють міжперіодну обробку (МО) кодованих сигналів:

- декодування з попередньої МО сигналів;
- декодування з наступної МО сигналів.

У зв'язку із цим виникає інтерес до розгляду характеристик виявлення (ХВ) СВ при різних способах обробки, а також до оцінки впливу коефіцієнта готовності відповідача та імовірності подавлення сигналів у КВ оброблюваного пакета СВ на ХВ.

Отримаємо порівняльні ХВ для обох способів обробки СВ при дії в радіоканалі флуктуаційних завад. Розрахунки проведемо для критеріїв і особливостей побудови апаратури обробки ІЧК в існуючих радіолокаційних системах спостереження.

Припустимо, що коефіцієнт готовності літакового відповідача дорівнює одиниці і подавлення сигналів у радіоканалі відповіді відсутнє. На виході приймача сигналів здійснюється двійкове (бінарне) квантування сигналів, тобто при фіксованому співвідношенні

сигнал-завада q і обраному порозі обмеження знизу z_0 однозначно визначаються імовірності – P_{11} (імовірність виявлення одиночного імпульсу сигналу) і P_{01} (імовірність появи викиду шуму на заданій часовій позиції).

Припустимо також, що в дешифраторі здійснюється логіка n/n , а в пристрої МО сигналів застосовується логіка k/m , при якій фіксація виявлення сигналу відбувається за наявності будь-яких k імпульсів на m позиціях.

Порівняємо ХВ обох способів обробки з використанням критерію Неймана – Пірсона, тобто при фіксованому рівні хибних тривог знайдемо ХВ (імовірності виявлення кодованого сигналу) залежно від співвідношення сигнал-завада для моменту першого виявлення об'єкта (виконання критерію виявлення початку інформаційного пакета).

Для способу декодування з попередньої МО сигналів імовірність проходження кодованих сигналів і хибних тривог через пристрій МО сигналів можна записати як

$$D_1 = \sum_k^m C_m^k P_{11}^k (1 - P_{11})^{m-k}; \quad F_1 = \sum_k^m C_m^k P_{01}^k (1 - P_{01})^{m-k}.$$

Імовірності P_{01} і P_{11} визначаються за заданими співвідношеннями:

$$P_{01} = e^{-z_0^2/2}; \quad P_{11} = \int_{z_0}^{\infty} x e^{-(x^2+q^2)} I_0(qx) dx,$$

де $z_0 = z/\sigma$ – відношення поріг/шум; $I_0(qx)$ – модифікована функція Бесселя першого роду нульового порядку.

Імовірності проходження корисних та хибних сигналів через дешифратор можна визначити відповідно:

$$P_{1d} = \left[\sum_{i=k}^m C_k^m P_{11}^k (1 - P_{11})^{m-k} \right]^n; \quad F_{1d} = \left[\sum_{i=k}^m C_k^m P_{01}^k (1 - P_{01})^{m-k} \right]^n.$$

При декодуванні з наступною МО прийнятих сигналів імовірність проходження n імпульсних ІЧК і хибних сигналів через дешифратор

$$D_d = P_{11}^n; \quad F_d = P_{01}^n.$$

Імовірності виявлення корисних сигналів і хибних тривог на виході пристроїв МО обчислюються відповідно:

$$P_{2d} = \sum_{i=k}^m C_k^m D_d^k (1 - D_d)^{m-k}; \quad F_{2d} = \sum_{i=k}^m C_k^m F_d^k (1 - F_d)^{m-k}.$$

Наведені дослідження ХВ для двох способів обробки прийнятих сигналів при дії у каналі відповіді флуктуаційної завади не враховують імовірність подавлення СВ ХІЗ та реального коефіцієнта готовності відповідача.

Зазначимо, що наявність завад, як у каналі запиту, так і у каналі відповіді запитальних систем спостереження приводить до подавлення окремих імпульсів СВ, до утворення хибних СВ. У цьому випадку коефіцієнт готовності ЛВ, як правило, не дорівнює одиниці.

Отримаємо порівняльні характеристики виявлення для розглянутих способів обробки з урахуванням реального коефіцієнта готовності ЛВ й імовірності подавлення СВ. При цьому зробимо допущення, що імовірність подавлення СВ не впливає на утворення хибних тривог. У зв'язку з цим будемо визначати тільки імовірність виявлення кодованих сигналів.

Для першого способу декодування імовірність проходження кодованих сигналів через пристрій МО, з урахуванням коефіцієнта готовності ЛВ й імовірності подавлення СВ, можна визначити з співвідношення

$$D_1 = \sum_{i=0}^{m-k} C_m^i [P_0(1-P_p)]^{m-i} [1-P_0(1-P_p)]^i \sum_{j=0}^{m-k-i} C_{m-i}^j P_{11}^{m-j-i} (1-P_{11})^j,$$

де P_p – імовірність подавлення сигналів відповіді.

Імовірність виявлення кодованого сигналу на виході дешифратора в цьому випадку можна записати як

$$D_{1d} = \sum_{i=0}^{m-k} C_m^i [P_0(1-P_p)]^{m-i} [1-P_0(1-P_p)]^i \left[\sum_{j=0}^{m-k-i} C_{m-i}^j P_{11}^{m-j-i} (1-P_{11})^j \right]^n. \quad (7)$$

При декодуванні з наступною МО прийнятих сигналів імовірність проходження n -імпульсних ПЧК через дешифратор, з урахуванням впливу коефіцієнта готовності ЛВ та імовірності подавлення СВ, можна визначити як

$$D_d = P_0 P_p P_{11}^n.$$

Імовірність виявлення корисних сигналів на виході пристрою МО сигналів у цьому випадку

$$D_{2d} = \sum_{i=0}^{m-k} C_m^i (P_0 P_p P_{11}^n)^{m-i} [1-P_0 P_p P_{11}^n]^{m-i}. \quad (8)$$

Вирази (7) і (8) отримано для загального випадку, коли P_p й P_{11} змінні. При $P_p = 1$ – це окремий випадок, коли враховуються тільки завади. При $P_{11} = 1$ – це інший окремий випадок, коли враховується тільки вплив імовірності подавлення СВ. У цьому випадку, як видно з (7) і (8), імовірність виявлення для обох способів обробки однакова.

Якщо припустити, що $P_{sp}(x_i)$ однакова в межах всієї ширини діаграми спрямованості антен суміщеної радіолокаційної системи спостереження (пачка прийнятих сигналів має прямокутну форму), то алгоритм (6) зводиться до виразу

$$\sum_{i=1}^N x_i \geq C_1. \quad (9)$$

Як впливає з (9), у разі прямокутної пачки процедура виявлення ПО зводиться до підрахунку одиниць в межах ширини пачки і порівняння числа накопичених імпульсів з пороговим числом C_1 . Так як в цьому випадку схема виходить досить простою, а втрати в пороговому відношенні сигнал-шум незначні, то саме цей алгоритм широко використовується на практиці.

Аналіз ефективності алгоритмів інформаційного забезпечення проаналізуємо з урахуванням кінцевого результату, а саме – виявлення ПО. Використуємо правила виявлення ПО за пачкою двійково-квантованих сигналів, а також будемо розглядати випадок дешифрованих сигналів з виходів вторинних радіолокаційних систем спостереження. Будемо досліджувати два алгоритми об'єднання результатів виявлення:

- каналне накопичення і об'єднання результатів (НВ);
- об'єднання каналних рішень і накопичення (ВН).

Також проведемо порівняльний аналіз характеристик виявлення розглянутого і використовуваного на практиці виявлювачів ПО. Будемо розглядати випадок однакових значень

відносин сигнал-шум $q_i, i = \overline{(1, m)}$ для сигналів як первинного, так і вторинного каналів спільної радіолокаційних систем спостереження. У цьому випадку багатоканальне виявлення дає найбільший ефект. При такому розгляді питання у всіх каналах виявлення сигналів повинні бути однакові відносні пороги. Цим забезпечується однакова імовірність помилкової тривоги $F_i = F_0$. Однаковими будуть і імовірності виявлення $D_i = D_0, i = \overline{(1, m)}$. У цих умовах для незалежних флуктуацій амплітуд оптимальним вирішальним правилом для спільної обробки є правило « k з m ». Вихідна імовірність хибної тривоги F визначається виявленням ПО. Переймаючись припустимою можливістю F , отримуємо для вибраного вирішального правила F_0 в кожному з каналів спільної радіолокаційної системи спостереження повітряного простору.

Таким чином, отримавши для заданої імовірності F і будь-якого вирішального правила імовірність F_0 в кожному приймальному каналі, можна обчислити вірогідність D_0 в кожному приймальному каналі, а потім обчислити вірогідність виявлення ПО D . При незалежних флуктуаціях сигналу в каналах прийому спільної радіолокаційної системи спостереження повітряного простору для кожного m існує оптимальне вирішальне правило. При малому числі каналів обробки, що нами розглядається, оптимальним є правило «1 з m ». Однак в каналі ідентифікації повинне бути реалізовано тільки правило « m з m ». Проробивши аналогічні операції з вихідними показниками якості виявлення сигналів, можемо отримати результуючі характеристики виявлення на виході виявлювача ПО. Другий поріг C_2 будемо вибирати, виходячи з половини пачки оброблюваних сигналів.

На рис. 1 – 3 наведено характеристики виявлення ПО для розглянутого та рекомендованого виявлювачів ПО при використанні двох каналів виявлення (первинний і вторинний).

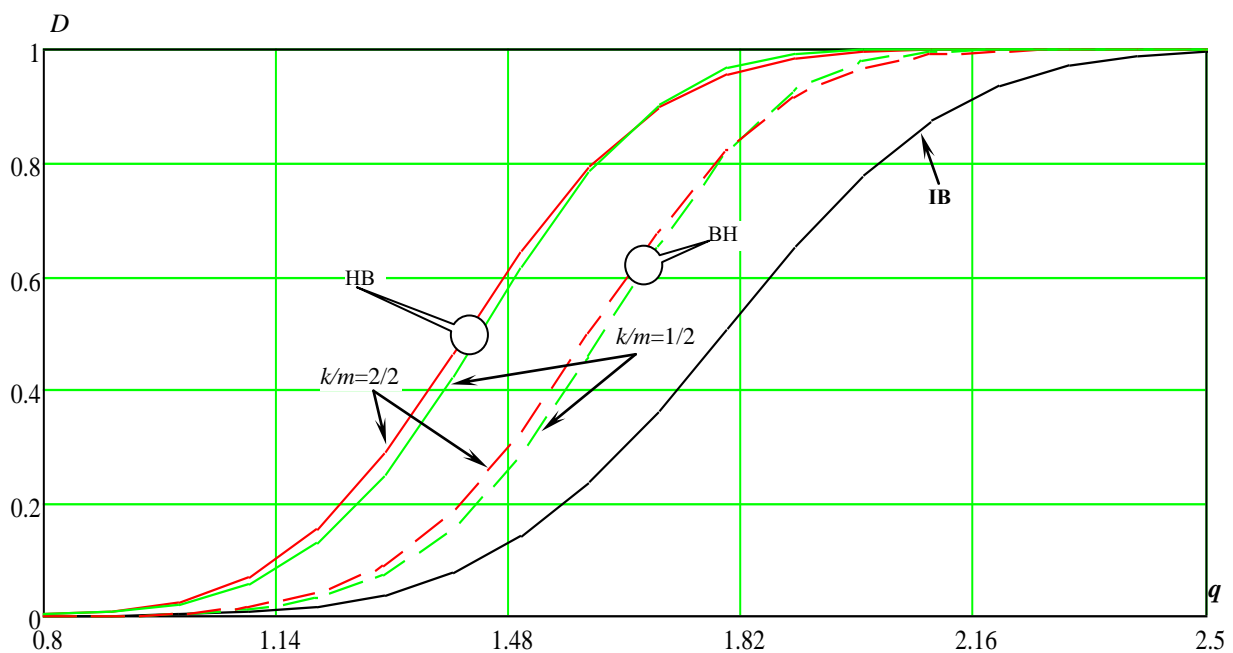


Рис. 1. Виявлення повітряних об'єктів при $P_0 = 1$

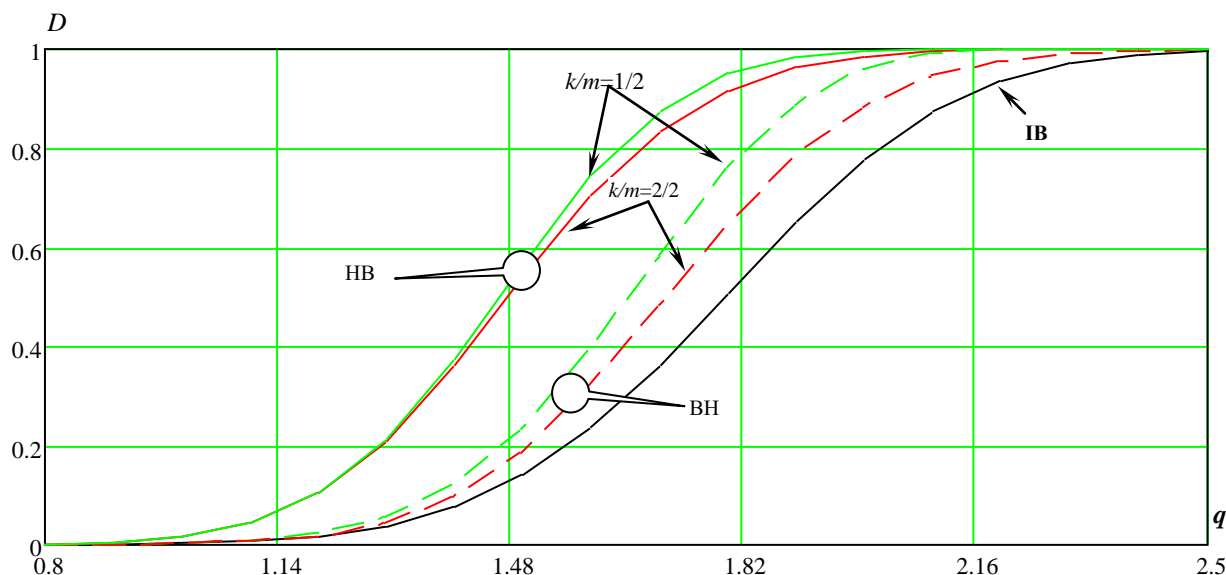


Рис. 2. Виявлення повітряних об'єктів при $P_0 = 0,95$

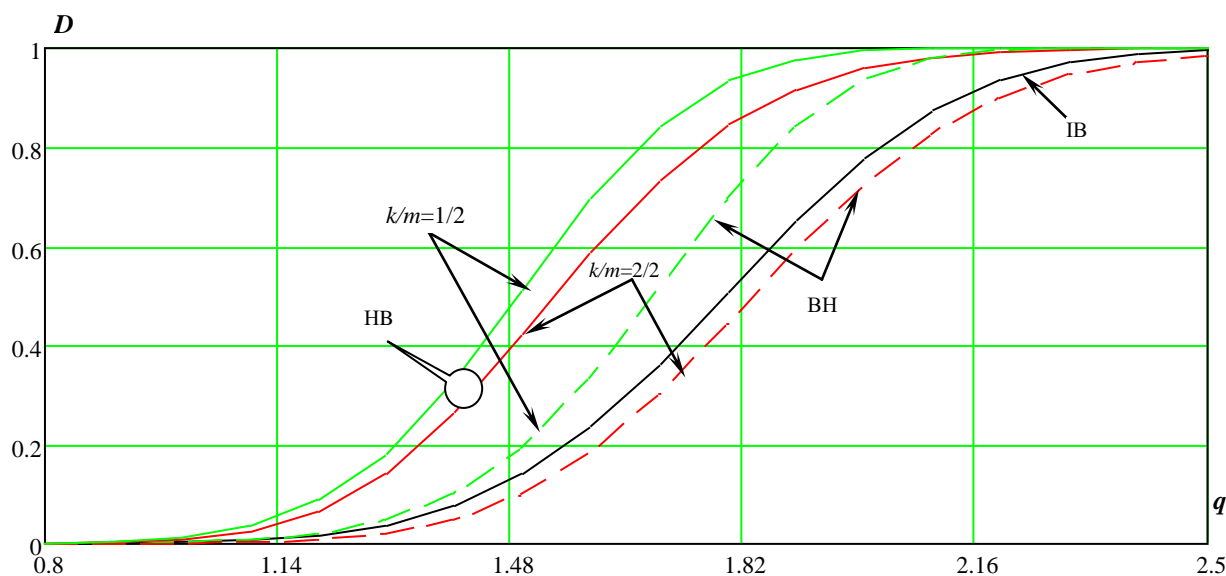


Рис. 3. Виявлення повітряних об'єктів при $P_0 = 0,9$

Як випливає з представлених залежностей, розглянута структура інформаційного забезпечення системи контролю повітряного простору має деякі переваги в порівнянні з тією, що використовується в даний час.

Так, для умови, що коефіцієнт готовності літакового відповідача дорівнює одиниці, що наведено на рис. 1, та відношення сигнал-шум, котре дорівнює 1,82, імовірність виявлення ПО для існуючого варіанту складає 0,53, а для варіантів виявлення-накопичення та накопичення-виявлення при вказаних критеріях виявлення складає 0,85 та 0,96 відповідно.

При зменшенні коефіцієнта готовності літакового відповідача до 0,95 (рис. 2) та відношенні сигнал-шум, що дорівнює 1,82, імовірність виявлення ПО для варіанта накопичення-виявлення та критерію $k/m=1/2$, складає 0,97, а для критерію $k/m=2/2$ – складає 0,95. Для варіанта виявлення-накопичення при критерію $k/m=1/2$ складає 0,8, а для критерію $k/m=2/2$ – складає 0,738.

При зменшенні коефіцієнта готовності літакового відповідача до 0,9 (рис. 3) та відношенні сигнал-шум, що дорівнює 1,82, імовірність виявлення ПО для варіанта накопичення-виявлення та критерію $k/m=1/2$ складає 0,95, а для критерію $k/m=2/2$ – складає 0,89. Для варіанта виявлення-накопичення при критерії $k/m=1/2$ складає 0,73, а для критерію $k/m=2/2$ – складає 0,49.

Порівняльний аналіз рис. 1 – 3 дозволяє зробити наступні висновки: якість інформаційного забезпечення споживачів на підставі запропонованої структури в порівнянні з використовуваною в даний час структурою обробки інформаційного забезпечення споживачів має кращі показники при використанні методу обробки сигналів, заснованого на накопиченні і з наступним об'єднанням; коефіцієнт готовності ЛВ істотним чином впливає на якість інформаційного забезпечення. Так, вже при $P_0 < 0,9$ використання цілочисельної логіки об'єднання інформації небажано.

Слід зазначити, що розглянуто випадок однакового відношення сигнал-шум в каналах обробки радіолокаційних систем спостереження. На практиці ж, відношення сигнал-шум вторинних каналів спільної радіолокаційної системи спостереження значно перевершує цей показник первинного каналу.

Висновки

Проведено аналіз ефективності алгоритмів інформаційного забезпечення на базі розподіленої обробки радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору з урахуванням кінцевого результату, а саме – виявлення повітряних об'єктів за пачкою двійково-квантованих сигналів з урахуванням двох алгоритмів об'єднання результатів виявлення:

- каналне накопичення і об'єднання результатів;
- об'єднання каналних рішень і накопичення.

Це показує, що:

- якість інформаційного забезпечення споживачів на підставі запропонованої структури значно вище в порівнянні з використовуваною структурою обробки радіолокаційної інформації;
- якість інформаційного забезпечення споживачів має кращі показники при використанні методу обробки сигналів, заснованого на накопиченні сигналів з подальшим об'єднанням результатів виявлення;
- коефіцієнт готовності ЛВ істотним чином впливає на якість інформаційного забезпечення, вже при $P_0 < 0,9$ використання цілочисельної логіки об'єднання інформації виявлення небажано.

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. Andrusovich, 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 Conference 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. Свид І. В. Обробка радіолокаційної інформації систем спостереження повітряного простору : монографія. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. 224 с.
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. 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. 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. 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 // 36. наук. пр. Харк. 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 : Друкарня 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. Толюпа 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 // Радиоэлектронні 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 // IEE Proceedings F: Communications Radar and Signal Processing, vol. 130, no. 6, pp. 484 – 494, 1983.
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. Andrusevich 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.
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. 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.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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 27.02.2023

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>

Старокожев Святослав Валерійович – аспірант кафедри мікропроцесорних технологій і систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна; email: sviatoslav.starokozhev@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1600-1337>