

В. М. Ліщенко

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД ОБРОБКИ НЕКОГЕРЕНТНИХ СИГНАЛІВ В МУЛЬТИРАДАРНІЙ СИСТЕМІ ОДНОТИПНИХ ДВОКООРДИНАТНИХ ОГЛЯДОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

Анотація. Предметом вивчення в статті є метод обробки некогерентних сигналів в мультирадарній системі. **Метою** є підвищення ефективності виявлення повітряних об'єктів за рахунок об'єднання некогерентних сигналів однотипних двокоординатних радіолокаційних станцій в мультирадарній системі. **Завдання:** аналіз тенденцій розвитку повітряних об'єктів, аналіз ефективності виявлення малопомітних повітряних об'єктів, розробка методу обробки некогерентних сигналів в мультирадарній системі оглядових радіолокаційних станцій. Використовуваними **методами** є: методи системного аналізу, теорії ймовірності, математичної статистики, математичний апарат теорії матриць, теорії статистичної радіотехніки, теорії радіолокації. Отримані такі **результати**. Розроблений метод обробки некогерентних сигналів в мультирадарній системі. Встановлено, що при некогерентній обробці сигналів ефективність у вираші у відношенні сигнал/шум дорівнює 11 дБ для мультирадарної системи з чотирьох радіолокаційних станцій у порівнянні з автономною радіолокаційною станцією. **Висновки.** Найбільшу ефективність у вираші у відношенні сигнал/шум показало додавання другої радіолокаційної станції. Встановлено, що оптимальна кількість радіолокаційних станцій у складі мультирадарної системи не більше чотирьох. Подальше збільшення кількості радіолокаційних станцій погіршує практичну значущість та економічну доцільність створення системи.

Ключові слова: радіолокаційна станція, мультирадарна система, повітряний об'єкт, некогерентна обробка, крива виявлення, ймовірність правильного виявлення, ймовірність хибної тривоги.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді.

В умовах ведення сучасних гібридних та мережецентричних війн побудова надійної системи протиповітряної оборони (ППО) значно ускладнюється через появу малопомітних (з низьким рівнем радіолокаційного контрасту) та малорозмірних повітряних об'єктів (ПО) [1–3].

З досвіду ведення сучасних локальних збройних конфліктів відомо, що малорозмірні БПЛА в більшості випадків не виявлялися існуючими радіолокаційними станціями (РЛС) [1–4].

У теперішній час розроблюються новітні та модернізуються існуючі зразки РЛС у тому числі з цифровими фазованими антенними решітками, але цей процес є поступовим та коштовним. Тому, в цілому наявна радіолокаційна техніка не забезпечує повністю вирішення завдань виявлення малопомітних ПО. У той же час в наявності велика кількість оглядових двокоординатних РЛС "старого" парку типу П-18. Указані РЛС не спроможні виявляти сучасні малопомітних ПО з заданими показниками якості [2]. Таким чином, у теперішній час при вирішенні задачі виявлення малопомітних ПО загострилася невідповідність між тенденціями розвитку ПО та можливостями існуючих РЛС щодо виявлення малопомітних ПО з необхідною ефективністю.

Для вирішення указаної невідповідності запропоновано об'єднати існуючі оглядові двокоординатні РЛС в мультирадарні системи (МРС) з сумісною обробкою сигналів [5–9].

Мета статті – підвищення ефективності виявлення ПО за рахунок об'єднання некогерентних сигналів однотипних двокоординатних РЛС в МРС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день задачі пошуку та виявлення ма-

лопомітних ПО вирішуються шляхом ведення спостереження, використанням, радіотехнічних, інфрачервоних, оптичних та акустичних засобів спостереження. Проте застосування радіолокаційних засобів спостереження має свої беззаперечні переваги перед вищезазначеними способами [5–10]. В останні роки ведуться розробки та широко застосовуються нетрадиційні методи: використання сторонніх джерел підсвіту, з використанням ефекту "радіолокації на просвіт", застосуванням пасивно-активних радіолокаційних комплексів та інші [5–10].

Перераховані методи засновані на загальній сучасній тенденції у розвитку радіолокаційної техніки – об'єднанні окремих пристроїв (засобів) у системи. Відомо, що існує цілий ряд різних типів мультирадарних систем. Окремі позиції елементів таких систем просторово рознесені одна від одної, при цьому обробка радіолокаційної інформації (РЛІ) проводиться в центральному пункті обробки, який може бути суміщений з однією з позицій або розташований окремо. В такому пункті доцільно проводити сумісну обробку радіолокаційної інформації, ефективність якої залежить від ступеню когерентності, яка забезпечується в системі [6, 9]. В роботі [5] запропоновано об'єднати існуючі оглядові двокоординатні РЛС у синхронну МРС з сумісною обробкою. Метод формування узгодженої зони огляду малобазової МРС однотипних оглядових РЛС з механічним обертанням наведено на рис. 1 [5].

Основна частина

Створення МРС дає можливість вирішити завдання збільшення енергетичного потенціалу РЛС, збільшення коефіцієнту підсилення антенних систем або використання системних ефектів. Використання системних ефектів при об'єднанні автономних РЛС в МРС пов'язано з можливостями реалізації різного

ступеню когерентності просторово рознесених позицій та сумісним прийомом ехосигналів [5, 6, 8].

Кожна РЛС випромінює свій зондувальний сигнал (ЗС), який не корельований із ЗС інших РЛС. Сигнали усіх РЛС випромінюються одночасно. Не корельованість (ортогональність) може забезпечуватися за рахунок [9, 10]:

- рознесення по частоті (частотна);
- кодування сигналів (кодова).

Кожна РЛС приймає ехо сигнали:

- свій ЗС, відбитий від ПО;
- відбитий від ПО ЗС сусідніх РЛС.

В залежності від побудови системи синхронізації МРС, сигнали, що випромінюються РЛС можуть бути взаємно когерентними або некогерентними. Отже може утворюватися МРС з взаємно когерентними або взаємно некогерентними сигналами.

Розглянемо МРС при використанні ортогональних взаємно некогерентних ЗС. Їх обробка в приймальних системах просторово-рознесених РЛС обумовлюється наступними особливостями:

- ступенем когерентності приймальних систем просторово-рознесених РЛС;
- ступенем взаємної просторової кореляції ехо-сигналів від ПО на входах приймачів просторово-рознесених РЛС.

Розглянемо випадок, коли кожна РЛС зі складу МРС, має можливість примати та обробляти усі сигнали, що випромінюються в МРС. При випромінюванні в МРС взаємно некогерентних ЗС, але забезпеченні взаємної когерентності приймальних систем РЛС (за рахунок відповідної синхронізації гетеродинів приймальних систем) та взаємної просторової кореляції флуктуації ехо-сигналів від ПО (за рахунок зменшення відстані між РЛС) оптимальний по критерію Неймана-Пірсона алгоритм виявлення має вигляд, з аналізу якого визнається послідовність дій (рис. 2):

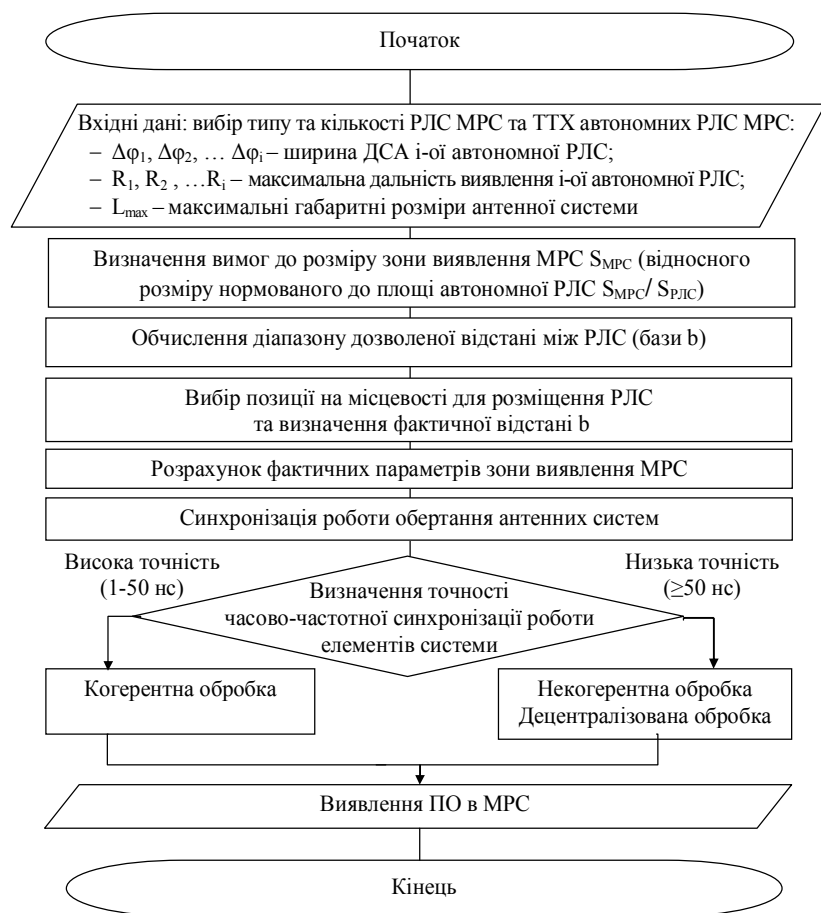


Рис. 1. Метод формування узгодженої зони огляду малобазової МРС однотипних оглядових РЛС з механічним обертанням



Рис. 2. Метод обробки некогерентних сигналів в МРС

$$L = \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{npj}) \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) x_j(t) dt \right|^2 > h, \quad (1)$$

де τ_{npj} – врахування часу запізнення ЗС, що випромінюється i -ою РЛС, в приймальному пристрої j -ої РЛС; $S_{i0}^*(t-t_0)$ – імпульсна характеристика УФ сигналу, що випромінюється i -ою РЛС; $x_j(t)$ – сигнал, що приймається в приймальному пристрої j -ої РЛС; N – кількість РЛС, що випромінюють ортогональні сигнали; M – кількість РЛС, що приймають ехо-сигнали. Проведемо аналіз ефективності методу зображеного на рис. 2. Вихідна статистика за відсутності сигналу визначається виразом (2):

$$L_0 = \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{npj}) \times \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) n_j(t) dt \right|^2 = \sum_{i=1}^M |Z_{0i}|^2, \quad (2)$$

$$\text{де } Z_{0i} = \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{npj}) \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) n_j(t) dt; \quad (3)$$

$n_j(t)$ – шумовий процес в j -ої РЛС.

Статистика Z_{0i} є гаусовою випадковою величиною з нульовим середнім, а дисперсія статистики (3) визначається виразом (4):

$$\frac{1}{2} \overline{Z_{0i}^* Z_{0i}} = \sum_{j=1}^N N_0 \int_{-\infty}^{\infty} |S_{i0}^*(t)|^2 dt = 2N_0 N \tau_i; \quad (4)$$

$$h_0 = F^{-1} \left(\frac{p}{v} \right) = \left\{ h_0 : F \left(\frac{h_0}{v} \right) = p \right\}, \quad (5)$$

де h_0 – значення порогу для імовірності хибної тривоги P_{xm} ; $v=2M$ – кількість ступенів свободи;

$$p = (1 - P_{xm}) = F \left(\frac{h_0}{v} \right) = \int_0^{\frac{h_0}{v}} \frac{t^{(v-2)/2} e^{-t/2}}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} dt; \quad (6)$$

$\Gamma(\cdot)$ – Гамма функція.

Враховуючі ортогональність сигналів та незалежність випадкових флуктуацій амплітуд сигналів та власних шумів приймальних каналів середнє значення відношення сигнал/шум на вході детектора з урахуванням (4) має вигляд наведений у виразі (7):

$$\frac{1}{2} \overline{\frac{Z_{lic}^* Z_{lic}}{Z_o^* Z_o}} = \frac{2 \overline{E_c} N^2 \tau_i}{2 N_0 \tau_i N} = \frac{N \overline{E_c}}{N_0} = N \overline{q_c^2}, \quad (7)$$

де $\overline{q_{неког}^2}$ – середнє відношення сигнал/шум на вході детектора для сигналу одного типу; $\overline{E_c}$ – середня енергія одного сигналу на вході приймальної систе-

ми кожної РЛС; $\overline{q_c^2}$ – середнє відношення сигнал/шум по сигналу одного типу на виході однієї РЛС.

Із аналізу виразу (7) видно, що когерентне підсумовування сигналів одного типу на виходах РЛС при некогерентному підсумовуванні шумів забезпечує збільшення відношення сигнал/шум на вході детекторів в N разів відносно відношення сигнал/шум на виході кожної РЛС.

Для випадку, коли середнє відношення сигнал/шум однакові для всіх M сигналів, залежність імовірності правильного виявлення визначається виразом:

$$P_g \approx \left(1 + \frac{1}{M \overline{q_{неког}^2}} \right)^{M-1} \exp \left[-\frac{h_0 / 2}{1 + M \overline{q_{неког}^2}} \right], \quad (8)$$

де h_0 – нормований поріг, що визначається заданим рівнем хибної тривоги згідно виразу (5); M – кількість сигналів, що підсумовуються некогерентно.

Характеристики виявлення для однієї РЛС та малобазової МРС, яка реалізує метод виявлення згідно алгоритму (1) для випадку коли кожна РЛС приймає некогерентні сигнали усіх РЛС із МРС при імовірності хибної тривоги $P_{XT}=10^{-6}$ наведені на рис. 3.

На рис. 4 наведено залежність виграшу $K(m)$ у потрібному відношенні сигнал/шум в кожній з m РЛС зі складу МРС відносно автономної РЛС для забезпечення показників якості виявлення ПО в МРС ($P_B = 0,5, P_{XT} = 10^{-6}$) при некогерентному об'єднанні РЛС від кількості РЛС (m), що об'єднуються.

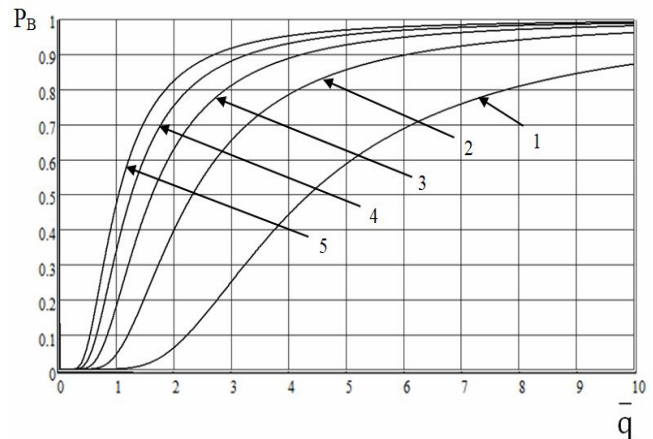


Рис. 3. Характеристики виявлення некогерентної МРС, яка реалізує метод (рис. 2), при імовірності хибної тривоги $P_{XT}=10^{-6}$: 1 – для автономної РЛС; 2 – при використанні 2-х РЛС в МРС; 3 – при використанні 3-х РЛС в МРС; 4 – при використанні 4-х РЛС в МРС; 5 – при використанні 5-х РЛС в МРС

Із аналізу залежності виграшу у відношенні сигнал/шум, наведеної на рис. 4 видно, що об'єднання двох РЛС у просторово-некогерентну МРС, яка реалізує метод згідно рис. 2, по відношенню до автономної РЛС забезпечує виграш біля 5,5 дБ. Додавання третьої РЛС забезпечує збільшення виграшу лише на 3 дБ.

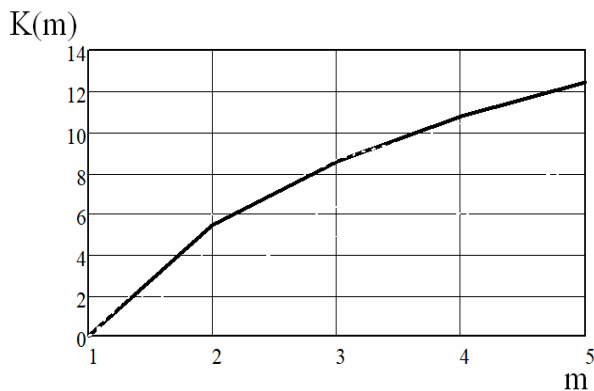


Рис. 4. Залежність виграшу у відношенні сигнал/шум в просторово-некогерентній МРС ($P_B=0.5$, $P_{\text{ЛТ}}=10^{-6}$)

Подальше збільшення кількості РЛС, що об'єднуються, приводить до збільшення виграшу не більше ніж на 2 дБ на кожен доданий РЛС з тенденцією до зниження цього показника з кожним наступним кроком. Тому, за критерієм ефективність-вартість найбільший ефект виявляється при об'єднанні двох РЛС.

Об'єднання чотирьох і більше РЛС також забезпечують зростання виграшу, але швидкість цього зростання значно менша, що погіршує практичну значущість та економічну доцільність.

Висновки

Встановлено, що при некогерентній обробці сигналів ефективність у виграші у відношенні сигнал/шум для малобазової МРС дорівнює 11 дБ для МРС з чотирьох РЛС у порівнянні з автономною РЛС.

Найбільшу ефективність у виграш показало додавання другої РЛС.

Встановлено, що оптимальна кількість РЛС у складі МРС не більше чотирьох. Подальше збільшення кількості РЛС погіршує практичну значущість та економічну доцільність.

Напрямок подальших досліджень: порівняння виграшу у підвищенні відношення сигнал/шум при об'єднанні сигналів в когерентній та некогерентній МРС при різних методах обробки сигналів у порівнянні з виявленням ПО в автономних РЛС не об'єднаних в систему.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Алімпієв А.М., Певцов Г.В. Особливості гібридної війни РФ проти України. Досвід, що отриманий Повітряними Силами Збройних Сил України. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017 № 2(27). С. 19–25
- Белавін О.В., Климченко В.Й., Камалтинов Г.Г., Маляренко О.С. Світові тенденції розвитку радіолокаційних засобів контролю повітряного простору. *Наука і оборона*. 2015. № 1. С. 48–53.
- Довідник учасника АТО: озброєння і військова техніка Збройних Сил Російської Федерації: Алімпієв А.М., Певцов Г.В., Гриб Д.А. (ред.). Х.: Оригінал, 2015. 732 с.
- Ліщенко В.М., Чалий В.В., Карлов А.Д. Малорозмірні безпілотні літальні апарати як об'єкти радіолокаційної розвідки. Системи управління, навігації та зв'язку. 2016. № 3(39) С. 27–32.
- Худов Г.В., Ліщенко В.М., Тютюнник В.О., Чалий В.В. Мультирадарна система оглядових радіолокаційних станцій з малою базою. Системи озброєння і військова техніка. 2017. № 4(52). С. 123–128.
- Khudov N. Method for the detection of small sized air objects by observational radars / N. Khudov, A. Zvonko, S. Kovalevskiy, V. Lishchenko, F. Zots // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – № 2/9 (92). – P. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126509>.
- Кучук Г. А. Метод синтезу інформаційної структури зв'язного фрагменту корпоративної мультисервісної мережі / Г. А. Кучук // *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил*. – 2013. – № 2(35). – С. 97-102.
- Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // *Системи обробки інформації*, 2016. – Вип. 9 (146). – С. 77-80.
- Chernyak V.S. *Fundamentals of Multisite Radar Systems*. Gordon and Breach Science Publishers. 1998. 475 p.
- Radar Handbook. Third Edition / Editor in Chief Merrill I. Skolnik. USA: McGraw-Hill, 2008. 1351 p.

Received (Надійшла) 23.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2020

The method of noncoherent signals processing in multiradar system of single-type two-coordinate survey radars with mechanical rotation

V. Lishchenko

Abstract. The subject matter of the article is the method of processing incoherent signals in a multi-radar system. The goal is to increase the detection efficiency of aerial objects by combining incoherent signals of the same two-coordinate radars in a multi-radar system. Objectives: analysis of trends in the development of airborne objects, analysis of the effectiveness of detection of unobtrusive air objects, development of a method of processing incoherent signals in a multi-radar system of radar observation stations. The methods used are: systems analysis methods, probability theory, mathematical statistics, mathematical apparatus of matrix theory, statistical radio engineering theory, radar theory. The following results were obtained. The method of processing incoherent signals in multiradar system is developed. In incoherent signal processing, the gain-to-signal gain for low-mass spatial-incoherent MRS is found to be 11 dB for MRS of four radars compared to autonomous radar. **Conclusions.** The highest efficiency in signal / noise gain was shown by the addition of a second radar. It is established that the optimal number of radars in the MRS is not more than four. Further increase in the number of radars impairs the practical importance and economic feasibility of creating a system.

Keywords: radar, multi radar system, air object, noncoherent processing, detection curve, probability of correct detection, probability of false alarm.