

**Худов Г.В., Ліщенко В.М., Гниря В.В.** Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## ОБРОБКА СИГНАЛІВ У МУЛЬТИРАДАРНІЙ СИСТЕМІ НА БАЗІ ДВОКООРДИНАТНИХ ОГЛЯДОВИХ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СТАНЦІЙ

**Анотація:** Предметом дослідження в роботі є проблема розробки методів обробки сигналів у мультирадарній системі на базі двокоординатних оглядових радіолокаційних станцій з механічним обертанням за азимутом. Метою статті є поліпшення якості виявлення повітряних об'єктів шляхом поєднання однотипних двокоординатних радіолокаційних станцій у мультирадарну систему. Пропонується об'єднати існуючі оглядові радіолокаційні станції в просторово рознесену когерентну мультирадарну систему. Обробка радіолокаційної інформації від окремих позицій таких просторово рознесених систем при цьому проводиться в центральному пункті обробки інформації 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. В роботі здійснено синтез оптимальних детекторів когерентного та некогерентного сигналів. Оцінено характеристики виявлення повітряних об'єктів у мультирадарній системі із сумісним прийомом сигналу. Отримані результати: нарощування кількості радіолокаційних станцій у системі, незалежно від ступеня когерентності сигналу показало найбільшу ефективність з точки зору збільшення відношення сигнал-шум при переході від автономної радіолокаційної станції до системи з двох елементів, раціональна кількість радарів в мультирадарній системі має становити не більше чотирьох. Очікуваний коефіцієнт посилення сигналу-шуму в системі з чотирьох радіолокаційних станцій може становити до вісімнадцяти децибелів для системи з когерентними сигналами та до одинадцяти децибелів для системи з некогерентними сигналами. Використання більше чотирьох радіолокаційних станцій недоцільно.

**Ключові слова:** радіолокаційна станція, мультирадарна система, обробка сигналів, відношення сигнал-шум.

**Khudov H.V., Lishchenko V.M., Hnyria V.V.** Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv

## PROCESSING OF SIGNALS AT THE MULTIRADAR SYSTEM ON THE BASIS OF SURVEILLANCE TWO COORDINATE RADARS

**Abstract:** The subject of research in this work is the problem of developing methods for signal processing in a multi-radar system based on two-coordinate surveillance radar stations with mechanical azimuth rotation. The aim of the article is to improve the quality of airborne objects detection by combining the same type of two coordinate radars in a multi-radar system. It is proposed to combine the existing surveillance radar stations into a spatially separated coherent multi-radar system. The processing of radar information from individual positions of such spatially separated systems is carried out in the central information processing point, which can be combined with one of the positions or located separately. At such a point, it is advisable to carry out joint processing of radar information, the efficiency of which depends on the degree of coherence that is provided in the system. The synthesis of optimal detectors of coherent and incoherent signals is carried out in the work. The characteristics of air object detection in a multi-radar system with compatible signal reception are evaluated. The results obtained: increasing the number of radar stations in the system, regardless of the degree of signal coherence, showed the greatest efficiency in terms of increasing the signal-to-noise ratio when moving from a stand-alone radar station to a two element system, the rational number of radar stations in a multi-radar system should not exceed four. The expected signal-to-noise gain in a system of four radars can be up to eighteen decibels for a system with coherent

signals and up to eleven decibels for a system with incoherent signals. The using of more than four radars is impractical.

**Keywords:** radar, multi-radar system, signal processing, signal-to-noise ratio.

**Худов Г.В., Лищенко В.Н., Гныря В.В.** Харьковський національний університет Воздушних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## **ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В МУЛЬТИРАДАРНОЙ СИСТЕМЕ НА БАЗЕ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ОБЗОРНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ**

**Аннотация:** Предметом исследования в работе является проблема разработки методов обработки сигналов в мультирадарной системе на базе двухкоординатных обзорных радиолокационных станций с механическим вращением по азимуту. Целью статьи является улучшение качества обнаружения воздушных объектов путем объединения однотипных двухкоординатных радиолокационных станций в мультирадарную систему. Предлагается объединить существующие обзорные радиолокационные станции в пространственно разнесённую когерентного мультирадарную систему. Обработка радиолокационной информации от отдельных позиций таких пространственно разнесенных систем при этом производится в центральном пункте обработки информации, который может быть совмещен с одной из позиций или располагаться отдельно. В таком пункте целесообразно проводить совместную обработку радиолокационной информации, эффективность которой зависит от степени когерентности, которая обеспечивается в системе. В работе осуществлен синтез оптимальных детекторов когерентного и некогерентного сигналов. Оценены характеристики обнаружения воздушных объектов в мультирадарной системе с совместимым приемом сигнала. Полученные результаты: наращивание количества радиолокационных станций в системе, независимо от степени когерентности сигнала показало наибольшую эффективность с точки зрения увеличения отношения сигнал-шум при переходе от автономной радиолокационной станции к системе из двух элементов, рациональное количество радиолокационных станций в мультирадарной системе должно составлять не более четырех. Ожидаемый коэффициент усиления сигнал-шума в системе из четырех радиолокационных станций может составлять до восемнадцати децибел для системы с когерентными сигналами и до одиннадцати децибел для системы с некогерентными сигналами. Использование более четырех радиолокационных станций нецелесообразно.

**Ключевые слова:** радиолокационная станция, мультирадарная система, обработка сигналов, отношение сигнал-шум.

**1. Вступ.** В контексті сучасних локальних збройних конфліктів, бойових дій на сході України побудова ефективної системи радіолокаційної розвідки повітряного простору суттєво ускладнюється через появу малопомітних повітряних об'єктів (ПО) (з низькими радіолокаційними відбивними властивостями) та ПО з малими фізичними розмірами [1, 2].

З досвіду операції Об'єднаних сил на сході України відомо, що малорозмірні безпілотні літальні апарати (БПЛА) в переважній більшості випадків не були виявлені з достатньою ефективністю наявними засобами радіолокації радіотехнічних військ [2-7], на які покладені функції розвідки в системі протиповітряної оборони (ППО).

Світові та вітчизняні виробники засобів радіолокаційної розвідки впроваджують такі новітні досягнення науки і техніки: послідовно-паралельний електронний огляд повітряного простору за кутом та двовимірне електронне сканування, використання адаптивних фазованих антенних решіток, цифровий синтез зондувальних сигналів, цифрова обробка сигналів [4-6].

На теперішній час у радіотехнічних військах Повітряних Сил Збройних Сил України проводиться оновлення парку радіолокаційних станцій (РЛС), а також модернізація існуючих зразків, включаючи РЛС з цифровими антенними решітками та з використанням

ширококутних сигналів, проте цей шлях багатоетапний і кошторисний. Тому існуючі засоби підрозділів не забезпечують повного вирішення завдань, покладених на них, особливо в тій частині, що стосується виявлення малопомітних повітряних об'єктів.

У той же час радіотехнічні підрозділи озброєні великою кількістю двокоординатних оглядових РЛС типу П-18 та його численними модернізованими версіями. Ці РЛС не спроможні забезпечити виявлення сучасного малопомітного повітряного об'єкта із зазначеними показниками якості [5].

Таким чином, в даний час при вирішенні проблеми виявлення малопомітних повітряних об'єктів загострилась невідповідність тенденцій розвитку ПО та можливостей існуючих оглядових РЛС з виявлення малопомітних повітряних об'єктів з необхідною ефективністю.

Для вирішення цієї невідповідності та підвищення ефективності виявлення непомітних ПО пропонується об'єднати існуючі двокоординатні оглядові РЛС у мультирадарну систему (МРС) із сумісною обробкою сигналів [8-10].

**2. Аналіз досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день завдання пошуку та виявлення малопомітних ПО вирішується шляхом спостереження, з використанням радіо- та інфрачервоних, оптичних, акустичних та комбінованих засобів розвідки (рис. 1).

Кожен із цих методів має свої переваги та недоліки. Застосування радіолокаційних методів розвідки має свої беззаперечні переваги перед іншими методами [11-15]. Крім відомих способів радіолокації в останні роки розробляються і широко використовуються нетрадиційні: використання зовнішніх джерел підсвіту, використання ефекту "радіолокації на просвіт", використання пасивно-активних радіолокаційних систем та інші.



Рис. 1. Методи, які зараз використовуються для виявлення повітряних об'єктів з низькою ефективною поверхнею розсіяння

Ці методи засновані на загальній тенденції розвитку технологій – інтеграції окремих пристроїв (засобів) в системи. Відомо, що існує ряд різних типів мультирадарних систем. Окремі положення елементів таких систем просторово віддалені один від одного, тоді як обробка радіолокаційної інформації здійснюється в центральній точці обробки, яка може поєднуватися з однією з позицій або розташовуватися окремо. На цьому етапі доцільно проводити спільну обробку радіолокаційної інформації, ефективність якої залежить від ступеня узгодженості, передбаченої системою [11-14].

### 3. Ціль (мета) дослідження, проведеного в статті.

Розробка методів обробки сигналів при формуванні когерентності різного ступеню у мультирадарній системі просторово-рознесених однотипних двокоординатних оглядових РЛС.

**4. Результати дослідження.** Створення мультирадарної системи дозволяє вирішити проблему збільшення енергетичного потенціалу радіолокації, збільшення коефіцієнта підсилення антенних систем або використання системних ефектів. Використання системних ефектів при об'єднанні автономних РЛС у багаторадіолокаційну систему пов'язано з можливістю реалізації різного ступеня узгодженості просторово розташованих позицій та комбінованого прийому відлуння [9-14]. У статті пропонується об'єднати існуючі оглядові двокоординатні РЛС у синхронну МРС згідно методу, описаного в [8], і пояснюється алгоритмом, наведеним у Рис. 2.

Одним із ключових питань, що визначає можливість створення синхронної когерентної МРС з просторово розташованими РЛС, є необхідність відповідності наступним умовам:

- частотна синхронізація;
- фазова синхронізація;
- часова синхронізація;
- узгоджений огляд простору.

На рис. 2 зображений приклад побудови МРС.

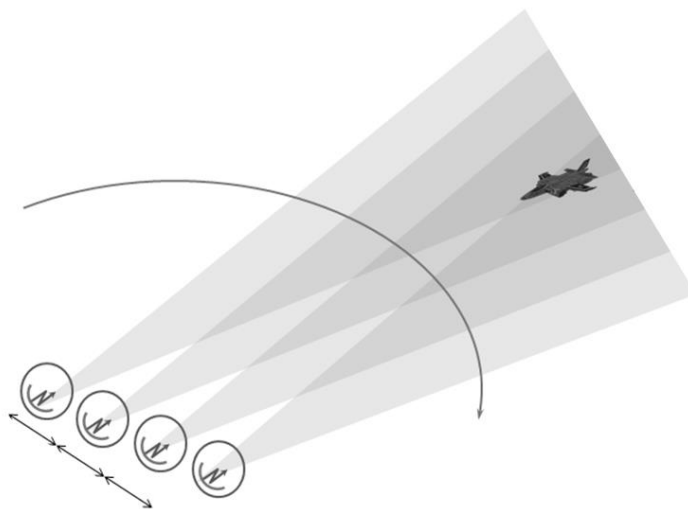


Рис. 2. Приклад об'єднання оглядових РЛС у систему з сумісною обробкою інформації при формуванні узгодженої зони огляду

Кожна з РЛС випромінює власний зондувальний сигнал, який не корельований з зондувальними сигналами інших РЛС. Сигнали всіх РЛС випромінюються одночасно. Некорельованість (ортогональність) може бути забезпечена:

- рознесенням частот;
- кодуванням сигналів.

Кожна РЛС приймає ехо-сигнали:

- свій передавальний сигнал, відбитий від ПО;
- відбиті від ПО зондувальні сигнали сусідніх РЛС.

Залежно від побудови системи синхронізації МРС, сигнали, що випромінюються РЛС, можуть бути взаємо когерентними або некогерентними. Отже, в МРС можна реалізувати методи обробки взаємо когерентних або взаємо некогерентних сигналів.

#### **Метод обробки когерентних сигналів у МРС.**

Розглянемо МРС, в якій кожна РЛС випромінює взаємно ортогональні сигнали. Ці сигнали відбиваються від ПО складної форми. Якщо розмір ПО набагато більший за довжину хвилі, сигнали, що надходять від кожної РЛС, коливаються. Як правило, коливання амплітуди описуються законом Релея, а коливання фаз рівномірно розподіляються в інтервалі  $(-\pi, \pi)$ . Характер коливань сигналів, що надходять від різних РЛС, залежить від ступеня їх просторової кореляції, яка визначається розміром ефективної бази (відстані) між РЛС (вираз (1)):

$$\frac{L_{\text{эф}}}{R} > (0.8...1) \frac{\lambda}{l_{\text{ПО}}}, \quad (1)$$

де  $L_{\text{эф}} = L \sin(\theta)$  – ефективна база між просторово рознесеними РЛС<sub>i</sub> та РЛС<sub>j</sub> ( $\theta$  – кут, що визначає напрямок на ПО);

$R$  – дальність до ПО від середини ефективної бази;

$\lambda$  – довжина хвилі РЛС;

$l_{\text{ПО}}$  – поперечний розмір ПО (паралельний ефективній базі).

Якщо буде забезпечено повну просторову кореляцію, комплексні амплітуди та початкові фази сигналів на входах різних позицій будуть міцно зв'язані та флукуватимуть дружно. Тому такі сигнали – просторово-когерентні. При малих базах між приймальними позиціями можливий жорсткий зв'язок між комплексними амплітудами ехосигналів в різних позиціях (повна часова кореляція).

На вхід приймача РЛС в кожній позиції поступають сигнали, що випромінюються усіма РЛС. Якщо усіма РЛС здійснюється випромінювання однакових сигналів таким чином, що забезпечується їх синфазне сумування на ПО, то на вході приймальних позицій буде тільки один ехо-сигнал. Ефективне значення амплітуди ехо-сигналу в цьому випадку буде дорівнювати сумі ефективних значень ехо-сигналів, утворених всіма передавальними позиціями [11–13].

В цьому випадку обробка здійснюється над  $M$  реалізацій незалежних гаусівських процесів. Середнє значення цих процесів в кожній приймальній позиції дорівнює сфазованій сумі  $M$  ехо-сигналів. Вихідне значення сигнал-шум при цьому визначається виразом (2):

$$q_{\text{вих}}^2 = NM^2 q_{\text{вих0}}^2, \quad (2)$$

де  $q_{\text{вих0}}^2$  – відношення сигнал-шум за потужністю на виході однопозиційної РЛС;

$N$  – кількість РЛС, які працюють в приймально-передавальному режимі;

$M$  – реалізацій незалежних гаусівських процесів.

Додатковий вииграш в  $M$  разів пояснюється тим, що при синфазному складанні сигналів на ПО не беруть участь шуми приймача, а при когерентному складанні в приймальних пристроях разом з сигналами некогерентно складаються шуми.

При когерентном підсумовуванні сигналів та лінійному детектуванні вихідна статистика

має розподіл Релея, а при квадратичному детектуванні – експоненціальний розподіл імовірностей. Для побудови кривих виявлення в обох випадках зручно використовувати відомий вираз для імовірності правильного виявлення та хибної тривоги (вираз (3)):

$$P_B = P_{ХТ}^{1/(1+q_{вих}^2)}, \quad (3)$$

де  $P_B$  – імовірність правильного виявлення;

$P_{ХТ}$  – імовірність хибної тривоги;

$q_{вих}^2$  – відношення сигнал-шум на вході порогового пристрою, яке визначається в залежності від особливостей побудови просторово-когерентної МРС.

На рис. 3 наведено криві виявлення для малобазової просторово-когерентної МРС.

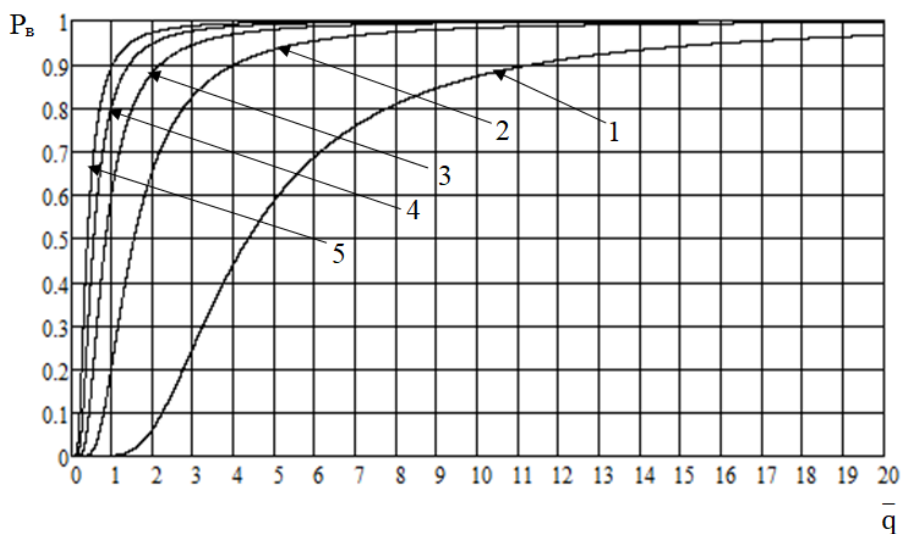


Рис. 3. Характеристики виявлення МРС:

- 1 – для автономної РЛС; 2 – при використанні 2-ох РЛС в МРС;
- 3 – при використанні 3-ох РЛС в МРС; 4 – при використанні 4-ох РЛС в МРС;
- 5 – при використанні 5-ох РЛС в МРС

На рис. 3 наведено розрахунки для випадку, коли усі однотипні РЛС малобазової просторово-когерентної МРС використовують однакові сигнали таким чином, що забезпечується їх синфазне сумування на ПО та на вході приймальних позицій отримуємо тільки один ехо-сигнал. Наведено розрахунки при роботі однієї автономної РЛС та при використанні МРС із декількох РЛС для імовірності хибної тривоги  $P_{ХТ}=10^{-6}$ .

Із аналізу характеристик виявлення, зображених на рис. 3, видно, що перехід від автономної РЛС (крива 1) до системи, яка здійснює об'єднання двох-трьох РЛС (криві 2, 3) приводить до суттєвого зсуву характеристик виявлення ліворуч. Збільшення кількості РЛС, що об'єднуються когерентно, більше трьох (криві 4, 5) не приводять до суттєвого зсуву характеристик виявлення ліворуч у порівнянні із характеристикою виявлення при об'єднанні трьох РЛС (крива 3).

#### Метод обробки некогерентних сигналів у мультирадарній системі.

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 зондувальних сигналів, 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 (вираз (4)):

$$L = \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{\text{пр}j}) \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) x_j(t) dt \right|^2 \Bigg|_{\leq} \Bigg|_{\geq} h, \quad (4)$$

де  $\tau_{\text{пр}j}$ , – врахування часу запізнення зондувального сигналу, що випромінюється і-ою РЛС, в приймальному пристрої j-ої РЛС;

$S_{i0}^*(t-t_0)$  – імпульсна характеристика УФ сигналу, що випромінюється і-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 якості методу обробки некогерентних сигналів, що реалізує алгоритм (вираз (4)). Вихідна статистика за відсутності сигналу визначається виразом:

$$L_0 = \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{\text{пр}j}) \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) n_j(t) dt \right|^2 = \sum_{i=1}^M |Z_{0i}|^2, \quad (5)$$

$$\text{where } Z_{0i} = \sum_{j=1}^N \exp(j\omega_0 \tau_{\text{пр}j}) \int_{-\infty}^{\infty} S_{i0}^*(t-t_0) n_j(t) dt; \quad (6)$$

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

Статистика  $Z_{0i}$  є гаусовою випадковою величиною з нульовим середнім, а дисперсія статистики (5) визначається виразом (7):

$$\frac{1}{2} \overline{Z_{0i}^* Z_{0i}} = \sum_{j=1}^N N_0 \int_{-\infty}^{\infty} |S_{i0}^*(t)|^2 dt = 2N_0 N \tau_i. \quad (7)$$

Обчислення порогу виявлення для заданої імовірності хибної тривоги здійснюється за виразом (5):

$$h_0 = F^{-1} \left( \frac{p}{v} \right) = \left\{ h_0 : F \left( \frac{h_0}{v} \right) = p \right\}, \quad (8)$$

де  $h_0$  – значення порогу для імовірності хибної тривоги  $P_{\text{хт}}$ ;

$v = 2M$  – кількість ступенів свободи;

$$p = (1 - P_{\text{хт}}) = F \left( \frac{h_0}{v} \right) = \int_0^{h_0} \frac{t^{(v-2)/2} e^{-t/2}}{2^{v/2} \Gamma(v/2)} dt; \quad (9)$$

$\Gamma(\cdot)$  – 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 (7) має вигляд наведений у виразі (10):

$$\overline{q_{\text{неког}}^2} = \frac{\frac{1}{2} \overline{Z_{\text{lic}}^* Z_{\text{lic}}}}{\frac{1}{2} \overline{Z_o^* Z_o}} = \frac{2 \overline{E_c} N^2 \tau_i}{2 N_0 \tau_i N} = \frac{N \overline{E_c}}{N_0} = N \overline{q_c^2}, \quad (10)$$

де  $\overline{q_{\text{неког}}^2}$  – середнє вiдношення сигнал-шум на входi детектора для сигналу одного типу;

$\overline{E_c}$  – середня енергiя одного сигналу на входi приймальної системи кожної РЛС;

$\overline{q_c^2}$  – середнє вiдношення сигнал-шум по сигналу одного типу на виходi однiєї РЛС.

З аналізу виразу (10) 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 вiдношення сигнал-шум однаковi для всiх  $M$  сигналiв, залежнiсть iмовiрностi правильного виявлення визначається виразом (11):

$$P_B \approx \left( 1 + \frac{1}{M \overline{q_{\text{неког}}^2}} \right)^{M-1} \exp \left[ -\frac{h_0/2}{1 + M \overline{q_{\text{неког}}^2}} \right], \quad (11)$$

де  $h_0$  – нормований порiг, що визначається заданим рiвнем хибної тривоги згiдно виразу (8);

$M$  – кiлькiсть сигналiв, що підсумовуються некогерентно.

Характеристики виявлення для однiєї РЛС та малобазової МРС для випадку коли кожна РЛС приймає некогерентнi сигнали усiх РЛС з МРС при iмовiрностi хибної тривоги  $P_{\text{ХТ}}=10^{-6}$  наведенi на рис. 4.

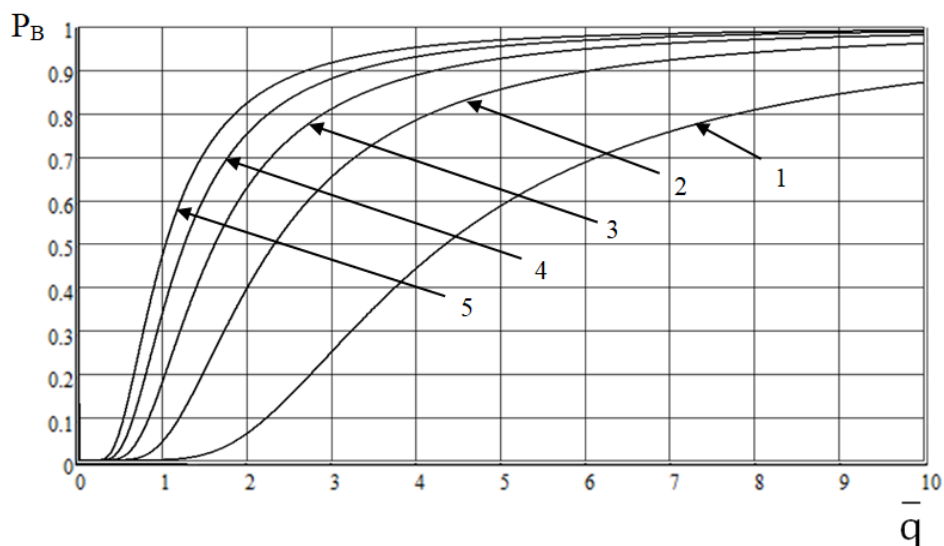


Рис. 4. Характеристики виявлення некогерентної МРС, яка реалізує метод (рис. 2), при імовірності хибної тривоги  $P_{\text{ХТ}}=10^{-6}$ :  
 1 – для автономної РЛС; 2 – при використанні 2-ох РЛС в МРС;  
 3 – при використанні 3-ох РЛС в МРС; 4 – при використанні 4-ох РЛС в МРС;  
 5 – при використанні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

З аналізу характеристик виявлення, показаних на рис. 3, 4 видно, що перехід від автономної РЛС (крива 1) до комбінації з двох або трьох РЛС (криві 2, 3) призводить до



значного зміщення характеристик виявлення ліворуч. Збільшення кількості об'єднаних в систему РЛС більш ніж до трьох, чотирьох (криві 4, 5) не призводить до значного зсуву характеристик виявлення ліворуч порівняно з характеристиками виявлення при поєднанні трьох РЛС (крива 3).

З рис. 5 видно залежність виграшу  $K$  (дБ) від відношення сигнал-шум у системі з  $m$  РЛС у порівнянні з автономною РЛС для забезпечення показників якості виявлення повітряних об'єктів ( $P_D=0,5$ ,  $P_F=10^{-6}$ ) для когерентного (крива 1) та некогерентного (крива 2) випадків.

З аналізу залежності виграшу у співвідношенні сигнал-шум, представленого на рис. 5, видно, що для випадку, коли однотипні РЛС малобазової просторово когерентної МРС використовують когерентні сигнали, забезпечується виграш близько 10 дБ при поєднанні двох РЛС і близько 5 дБ з додаванням третьої РЛС, а збільшення виграшу лише на 2,5 дБ з додаванням четвертої РЛС і подальше нарощування РЛС також забезпечує збільшення виграшу, але швидкість цього зростання набагато повільніше, що погіршує практичну значимість та економічну доцільність. Отже, підсумовуючи вищесказане, можна зробити висновок, що найбільша ефективність у підвищенні відношення сигнал-шуму спостерігається при поєднанні просторово розташованих однотипних РЛС у МРС при переході від однієї окремої РЛС до системи з двох або трьох РЛС.

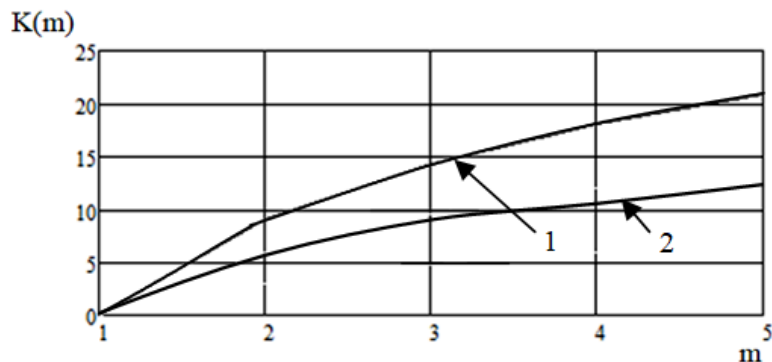


Рис. 5. Криві виграшу, якщо розглядати відношення сигнал-шум при сумісній обробці сигналів радіолокаційних станцій системи:  
1 - при когерентній обробці; 2 - при некогерентній обробці

Подальше збільшення кількості РЛС у кожному з випадків обробки когерентних та некогерентних сигналів супроводжується зниженням швидкості зростання виграшу при додаванні кожної наступної РЛС, і практично недоцільно використовувати в МРС більше чотирьох елементів з максимально можливим коефіцієнтом посилення близького до 2 дБ при додаванні останньої станції. Найбільшу ефективність у виграші відношення сигнал-шум показало додавання другого елемента системи для обробки когерентних та некогерентних сигналів і всі випадки показали оптимальну кількість елементів у МРС не більше чотирьох.

### 5. Обговорення результатів проведеного дослідження.

З наведених результатів дослідження методів обробки сигналів у різних варіаціях реалізації малобазової МРС оглядових РЛС зрозуміло, що на виході відбувається підвищення якості виявлення малопомітних ПО за рахунок сумісної обробки сигналів та використання енергії утвореного електромагнітного поля елементами системи в більшому ступені, ніж при автономній роботі РЛС або в системі з об'єднанням інформації на рівні третинної обробки. За критерієм ефективності та вартості найефективнішим є створення просторово когерентної МРС шляхом об'єднання двох-чотирьох однотипних РЛС.

У цьому випадку очікуваний коефіцієнт посилення відношення сигнал-шум може бути значно збільшено при відносно невеликій кількості радіолокаційних засобів. Використання

таких систем буде доцільним у випадках реагування на загрози на найбільш загрозливих напрямках, при охороні важливих державних та військових об'єктів.

**6. Висновки.** Таким чином, можна стверджувати, що найбільший вигреш у відношенні сигнал-шум продемонструвало додавання другої РЛС до системи, а оптимальна кількість РЛС у МРС не більше чотирьох. Тому, згідно з критерієм якість-вартість, найефективнішим є створення просторово когерентної МРС, але навіть у разі обробки некогерентних сигналів буде спостерігатися ефект підвищення якості виявлення ПО. Отже, для підвищення якості виявлення малопомітних ПО доцільно створити просторову малобазову синхронну МРС шляхом об'єднання від двох до чотирьох оглядових РЛС. Використання більше чотирьох РЛС недоцільно, оскільки це не призводить до значного збільшення виграшу. Очікуваний коефіцієнт збільшення порогового співвідношення сигнал-шум при використанні запропонованих методів обробки сигналів може становити до 18 дБ (для випадку обробки когерентних сигналів). Напрямок подальших досліджень полягає в розробці методів визначення висоти повітряних об'єктів у разі використання просторово розташованих двокоординатних оглядових РЛС як елементів синхронної малобазової МРС із сумісною обробкою сигналів.

### Список використаної літератури

1. Banasik M. How to understand the Hybrid War / M. Banasik // *Securitologia*. – 2015. – № 1. – pp. 19-34.
2. Алімпієв А.М. Особливості гібридної війни РФ проти України. Досвід, що отриманий Повітряними Силами Збройних Сил України / А.М. Алімпієв, Г.В. Певцов // *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2017. – № 2(27). – С. 19-25.
3. Multi-Static Primary Surveillance Radar – An examination of Alternative Frequency Bands [Електронний ресурс] / Dave Hill, Philip Galloway // *Report of EUROCONTROL* – 2017. – Issue 1.2. – 183 p. – Режим доступу: [http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/mspsr\\_study\\_report.pdf](http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/mspsr_study_report.pdf).
4. Lishchenko V. Proposals for Improving of Air Surveillance Informativity in MIMO Radar Systems Based on Two-Dimensional Radars / V. Lishchenko, V. Chaliy, H. Khudov, A. Zvonko // *IEEE 5 International scient.-pract. confer. Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, – 2018, – pp. 153-156. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632052>.
5. Khudov H. Method for the detection of small sized air objects by observational radars / H. Khudov, A. Zvonko, S. Kovalevskiy, V. Lishchenko, F. Zots // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – № 2/9 (92). – pp. 61–68. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126509>.
6. Lishchenko V. The Method of Increasing the Detection Range of Unmanned Aerial Vehicles In Multiradar Systems Based on Surveillance Radars / V. Lishchenko, H. Khudov, V. Tiutiunnyk, V. Kuprii, F. Zots, G. Misiyuk // *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, – 2019. – pp. 559—562. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783263>.
7. Lishchenko V. The Method of the Organization Coordinated Work for Air Surveillance in MIMO Radar / V. Lishchenko, T. Kalimulin, I. Khizhnyak, H. Khudov // *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2018) : International confer., September, 10-14, 2018 : thesis of reports*. — Odessa, 2018. — pp. 1—4. DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047560>.
8. Lishchenko V. The MIMO System on Based Existing Mechanical Rotation Radars with Wide Surveillance Area / V. Lishchenko, H. Khudov, B. Lisogorsky, O. Baranik, D. Holovniak,

O. Serdjuk // 2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kyiv, Ukraine, 2020, – pp. 625-628. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.50318.2020.9088746>.

9. Khudov H. The MIMO Surveillance Radars System with High Accuracy Finding 2D Coordinates / H. Khudov, V. Lishchenko, H. Hyshko, Y. Polonskyi, I. Khizhnyak, B. Riabukha // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – № 8(5). – pp. 2026–2030. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/91852020>.

10. Khudov H. The coherent signals processing method in the multiradar system of the same type two-coordinate surveillance radars with mechanical azimuthal rotation / H Khudov, V. Lishchenko, B. Lanetskii, V. Lukianchuk, S Stetsiv , I. Kravchenko // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – № 8(6). – pp. 2624–2630. DOI: [10.30534/ijeter/2020/66862020](https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/66862020).

11. Ruban, I. The Calculating Effectiveness Increasing of Detecting Air Objects by Combining Surveillance Radars into The Coherent System / I. Ruban, H. Khudov, V. Lishchenko, A. Zvonko, S. Glukhov, I. Khizhnyak, V. Maluha, Y. Polonskyi, R. Kushpeta // IJETER. – 2020. – Vol. 8., № 4. – pp. 1295–1301. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/58842020>.

12. Khudov H. The Proposals for Synchronization Positions of MIMO Radar System on the Basis of Surveillance Radars / H. Khudov, S. Kovalevskyi, A. Irkha, V. Lishchenko, O Serdiuk, F. Zots // Intern. Scient.-Pract. Conf. Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). – 2019. – pp. 547–551. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST.47496.2019.9061284>.

13. Chernyak V.S. Fundamentals of Multisite Radar Systems / V.S. Chernyak. – Gordon and Breach Science Publishers, 1998. – 475 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203755228>.

14. Radar Handbook. Third Edition / editor in chief, Skolnik, Merrill I. – USA: McGraw-Hill, 2008. – 1351 p.

15. Черняк В.С. О новом направлении в радиолокации / В.С. Черняк // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – №4 (том 8). – С. 477-489.

16. Advances in Bistatic Radar / edited by Nicholas J. Willis, Hugh D. Griffiths. – SciTech Publishing Inc., 2007. – 515 p.

## References

1. Banasik, M. (2015), “How to understand the Hybrid War”, *Securitologia*, № 1. pp. 19-34.
2. Alimpiiev, A.M. and Pevtsov, G.V. (2017), “Osoblyvosti hibrydnoi viiny RF proty Ukrainy. Dosvid, shcho otrymanyi Povitrianymy Sylamy Zbroinykh Syl Ukrainy” [The features of the hybrid war of the Russian Federation against Ukraine. Experience received by the Air Forces of the Armed Forces of Ukraine], *Science and Technology of the Air Force of Ukraine*, No. 2(27), pp. 19-25.
3. Dave Hill and Philip Galloway (2017), “Multi-Static Primary Surveillance Radar – An examination of Alternative Frequency Bands”, Report of EUROCONTROL. Issue 1.2. 183 p. URL: [http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/mspsr\\_study\\_report.pdf](http://www.eurocontrol.int/sites/default/files/content/documents/nm/mspsr_study_report.pdf). (accessed 21 September 2017).
4. Lishchenko, V., Chaliy, V., Khudov H. and Zvonko, A., “Proposals for Improving of Air Surveillance Informativity in MIMO Radar Systems Based on Two-Dimensional Radars”, *IEEE 5 International scient.-pract. confer. Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 2018, pp. 153-156. DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632052>.
5. Khudov, H., Zvonko, A., Kovalevskyi, S., Lishchenko, V. and Zots, F. (2018), Method for the detection of smallsized air objects by observational radars, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, № 2/9 (92), pp. 61–68, 2018. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126509>.

6. Lishchenko, V., Khudov, H., Tiutiunnyk, V., Kuprii, V., Zots, F. and Misiyuk, G. (2019), The Method of Increasing the Detection Range of Unmanned Aerial Vehicles In Multiradar Systems Based on Surveillance Radars, *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783263>.
7. Lishchenko, V., Kalimulin, T., Khizhnyak, I. and Khudov, H. (2018), “The Method of the organization Coordinated Work for Air Surveillance in MIMO Radar,” *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, Ukraine, 2018, pp. 1–4, DOI: <https://doi.org/10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047560>.
8. Lishchenko, V., Khudov, H., Lisogorsky, B., Baranik, O., Holovniak, D., and Serdjuk, O. (2020), “The MIMO System on Based Existing Mechanical Rotation Radars with Wide Surveillance Area,” *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 625–628, DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2020.9088746>.
9. Khudov, H., Lishchenko, V., Hyshko, H., Polonskyi, Y., Khizhnyak, I. and Riabukha, B. (2020), “The MIMO Surveillance Radars System with High Accuracy Finding 2D Coordinates”, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, № 8(5), pp. 2026–2030, 2020, DOI: [doi.org/10.30534/ijeter/2020/91852020](https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/91852020).
10. Khudov H, Lishchenko V, Lanetskii B, Lukianchuk V, Stetsiv S, Kravchenko I (2020), “The coherent signals processing method in the multiradar system of the same type two-coordinate surveillance radars with mechanical azimuthal rotation”, *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, № 8(6), pp. 2624–2630, 2020, DOI: [10.30534/ijeter/2020/66862020](https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/66862020).
11. Ruban, I., Khudov, H., Lishchenko, V., Zvonko, A., Glukhov, S., Khizhnyak, I., Maliuha, V., Polonskyi, Y. and Kushpeta, R. (2020), “The Calculating Effectiveness Increasing of Detecting Air Objects by Combining Surveillance Radars into The Coherent System”, *IJETER*, Vol. 8., № 4, 2020, pp. 1295–1301, DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/58842020>.
12. Khudov, H., Kovalevskyi, S., Irkha, A., Lishchenko, V., Serdiuk, O. and Zots, F. (2019), “The Proposals for Synchronization Positions of MIMO Radar System on the Basis of Surveillance Radars,” *Intern. Scient.-Pract. Conf. Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 2019, pp. 547–551. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST.2019.9061284>.
13. Chernyak, V.S. (1998), “Fundamentals of Multisite Radar Systems”, Gordon and Breach Science Publishers, 475 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203755228>.
14. Skolnik, Merill I. (2008), “*Radar Handbook*”, Third Edition, USA: McGraw-Hill, 1351 p.
15. Chernyak, V.S. (2009), “O novom napravlenyy v radyolokacyy”. [About a new direction in radar], *Applied electronics*, No 4 (tom 8), pp. 477–489.
16. Willis, Nicholas J. and Griffiths, Hugh D. (2007), “*Advances in Bistatic Radar*”, SciTech Publishing Inc., 515 p.