

УДК (621.396)

Ю.М. Седишев, В.О. Тютюнник, А.Ф. Шевченко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ ВИСОТИ ПОВІТРЯНИХ ЦІЛЕЙ В МУЛЬТИРАДАРНІЙ СИСТЕМІ ДВОКООРДИНАТНИХ ОГЛЯДОВИХ РЛС

При об'єднанні двокоординатних активних РЛС в мультирадарні системи створюються умови для визначення висоти повітряних цілей за рахунок використання багатопозиційних методів місцевизначення. В статті проводиться аналіз можливостей двопозиційних та трипозиційних систем, які утворюються двокоординатними РЛС, щодо визначення висоти повітряних цілей. Обґрунтовано вимоги до точності визначення координат повітряних цілей в РЛС, які об'єднуються в мультирадарну систему, для забезпечення можливості визначення висоти. Результати аналітичних розрахунків підтверджуються результатами статистичного моделювання.

**Ключові слова:** мультирадарні системи, мультирадарна обробка, багатопозиційні системи

### Вступ

**Постановка проблеми.** Розвиток цифрових технологій, елементної бази, поширення принципів уніфікації та модульності побудови апаратури забезпечує покращення тактико-технічних характеристик та розширення галузей використання оглядових радіолокаційних станцій (РЛС), засобів обробки та передачі радіолокаційної інформації (РЛІ). Це приводить до збільшення кількості і щільності розміщення використовуваних РЛС та приводить до спостереження однієї цілі одночасно декількома РЛС. Це створює умови для здійснення просторово-часової та мультирадарної обробки РЛІ за умови об'єднання оглядових РЛС у мультирадарні системи (МРС) на основі єдиного координато-часового забезпечення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час вже існують зразки апаратури, яка здійснює мультирадарну обробку [1 – 4]. Однак, у відомих системах мультирадарна обробка зводиться лише до об'єднання трас від джерел радіолокаційної інформації (ДРЛІ) з метою зменшення координатних помилок та забезпечення їх нерозривності. При об'єднанні трас використовуються або методи вагового об'єднання вимірювань від нерівноточних ДРЛІ, або обирається траса пріоритетного ДРЛІ [5, 6]. В існуючих МРС не використовуються методи визначення координат, які притаманні багатопозиційним системам та можуть бути реалізовані при мультирадарній обробці РЛІ.

**Метою статті** є оцінювання можливостей МРС, яка утворена двокоординатними активними оглядовими РЛС та мережею інформаційного обміну із єдиним координато-часовим забезпеченням, щодо визначення висоти повітряних цілей.

### Основний матеріал

Розглянемо МРС, яка утворюється просторово рознесеними двокоординатними активними оглядо-

вими РЛС, як рознесену багатопозиційну систему із двоетапною обробкою інформації [7, 8]. Перший етап обробки здійснюється на кожній позиції, де оцінюються дальність та азимут виявленої цілі. Другий етап обробки здійснюється в центральному пункті обробки, де виробляється остаточна оцінка координат з використанням відповідних методів місцевизначення [7 – 9].

Відомо, що в основі функціонування багатопозиційних систем з двоетапною обробкою лежить апріорна функціональна залежність, яка обумовлена геометрією системи [8]:

$$\lambda(t) = F(\alpha(t)), \quad (1)$$

де  $\lambda(t) = (\lambda_1^T, \lambda_2^T, \dots, \lambda_m^T, \dots, \lambda_M^T)$  – вектор первинних вимірювань;  $\alpha^T(t) = (x_\delta, y_\delta, z_\delta)$  – вектор параметрів цілі;  $F(\cdot)$  – функціональна залежність, яка обумовлена геометрією системи;  $M$  – кількість РЛС, які утворюють систему;  $\lambda_m^T = (R_m, \beta_m)$  – вектор первинних вимірювань на  $m$ -ої двокоординатної РЛС;  $R_m, \beta_m$  – оцінки дальності та азимуту цілі на  $m$ -ої РЛС.

Для знаходження вектору параметрів цілі  $\alpha$  по відомому вектору первинних вимірювань  $\lambda$  використовують функціональні залежності:

$$x_\delta = f_x(\lambda), \quad y_\delta = f_y(\lambda), \quad z_\delta = f_z(\lambda), \quad (2)$$

де  $f_x(\cdot), f_y(\cdot), f_z(\cdot)$  – функції, які отримані прямим рішенням оберненого алгебраїчного рівняння  $\alpha(t) = F^{-1}[\lambda(t)] = f[\lambda(t)]$ , яке утворюється із виразу (1).

В трикоординатних РЛС висота цілі розраховується по оцінках кута місця. Тому можливості МРС щодо визначення висоти цілі будуть залежить від її можливостей щодо визначення кута місця цілі. Ви-

ходячи з вищесказаного, кут місця цілі  $\varepsilon_{\delta}(\lambda)$  відносно початку системи координат визначається виразом (3). Середньоквадратичне відхилення (СКВ) оцінки кута місця  $\sigma_{\varepsilon}$  знаходиться методом лінеаризації у припущенні незалежності первинних вимірювань за виразом (4)

$$\varepsilon_{\delta}(\lambda) = \arctg \left( \frac{f_z(\lambda)}{\sqrt{f_x(\lambda)^2 + f_y(\lambda)^2}} \right) = \arctg \left( \frac{z_{\delta}}{\sqrt{x_{\delta}^2 + y_{\delta}^2}} \right); \quad (3)$$

$$\sigma_{\varepsilon} = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \left( \frac{\partial \varepsilon_{\delta}(\lambda)}{\partial \lambda_m(k)} \right)^2 \sigma_{\lambda_m(k)}^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \left( \frac{\partial \varepsilon_{\delta}}{\partial R_m} \right)^2 \sigma_{R_m}^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon_{\delta}}{\partial \beta_m} \right)^2 \sigma_{\beta_m}^2 + \left( \frac{\partial \varepsilon_{\delta}}{\partial \dot{A}_m} \right)^2 \sigma_{\dot{A}_m}^2 \right)} \quad (4)$$

де  $M$  – кількість РЛС, які утворюють МРС;  $K$  – розмірність вектору первинних вимірювань  $\lambda_m$ ;  $\lambda_m(k)$  –  $k$ -ий елемент вектору первинних вимірювань  $\lambda_m$ ;  $\sigma_{\lambda_m(k)}$  – СКВ оцінок  $k$ -ого елементу вектору первинних вимірювань  $\lambda_m$ ;  $\sigma_{R_m}$ ,  $\sigma_{\beta_m}$ ,  $\sigma_{\dot{A}_m}$  – СКВ оцінок дальності  $R_m$ , азимуту  $\beta_m$ , величини бази  $\dot{A}_m$  на  $m$ -ої РЛС.

Для геометрії МРС, зображеної на рис. 1, оцінювання  $\varepsilon_{\delta}$  можливо при використанні РЛІ від двох РЛС або від трьох РЛС.

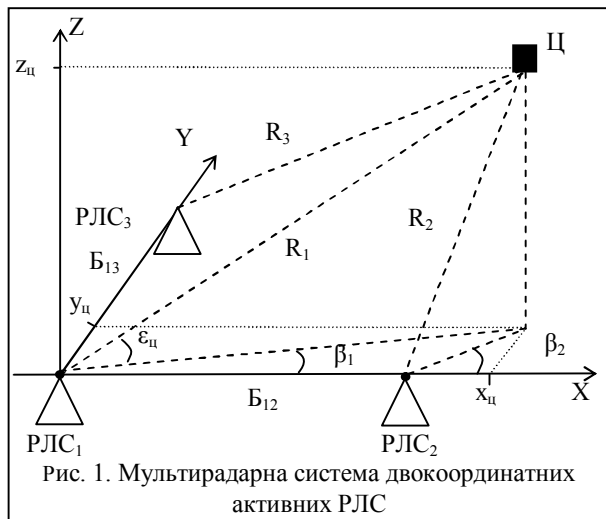


Рис. 1. Мультирадарна система двокоординатних активних РЛС

При використанні РЛІ від РЛС<sub>1</sub> та РЛС<sub>2</sub> вектор первинних вимірювань має вигляд  $\lambda = \begin{pmatrix} R_1 & R_2 \\ \beta_1 & \beta_2 \end{pmatrix}$ , а вираз (3) для визначення  $\varepsilon_{\delta}$  має вигляд (5).

Величина  $z_{\delta}$  визначається за відомою формулою [9], яка модифікована для геометрії МРС, зображеної на рис. 1.

Залежності СКВ оцінки кута місця  $\sigma_{\varepsilon}$  від координат цілі ( $R_{\delta}$ ,  $\beta_{\delta}$ ,  $\varepsilon_{\delta}$ ), які розраховані за виразами (4) і (5), наведено на рис. 2, а.

$$\varepsilon_{\delta}(R_1, \beta_1, R_2, \beta_2, \dot{A}_{12}) = \arcsin \left( \frac{z_{\delta}}{R_1} \right) = \arcsin \left( \frac{\sqrt{\frac{4}{\dot{A}_{12}^2} L(L - \dot{A}_{12})(L - R_1)(L - R_2) - \left( \frac{\dot{A}_{12} \sin(\beta_1) \sin(\beta_2)}{\sin(\beta_2 - \beta_1)} \right)^2}}{R_1} \right) \quad (5)$$

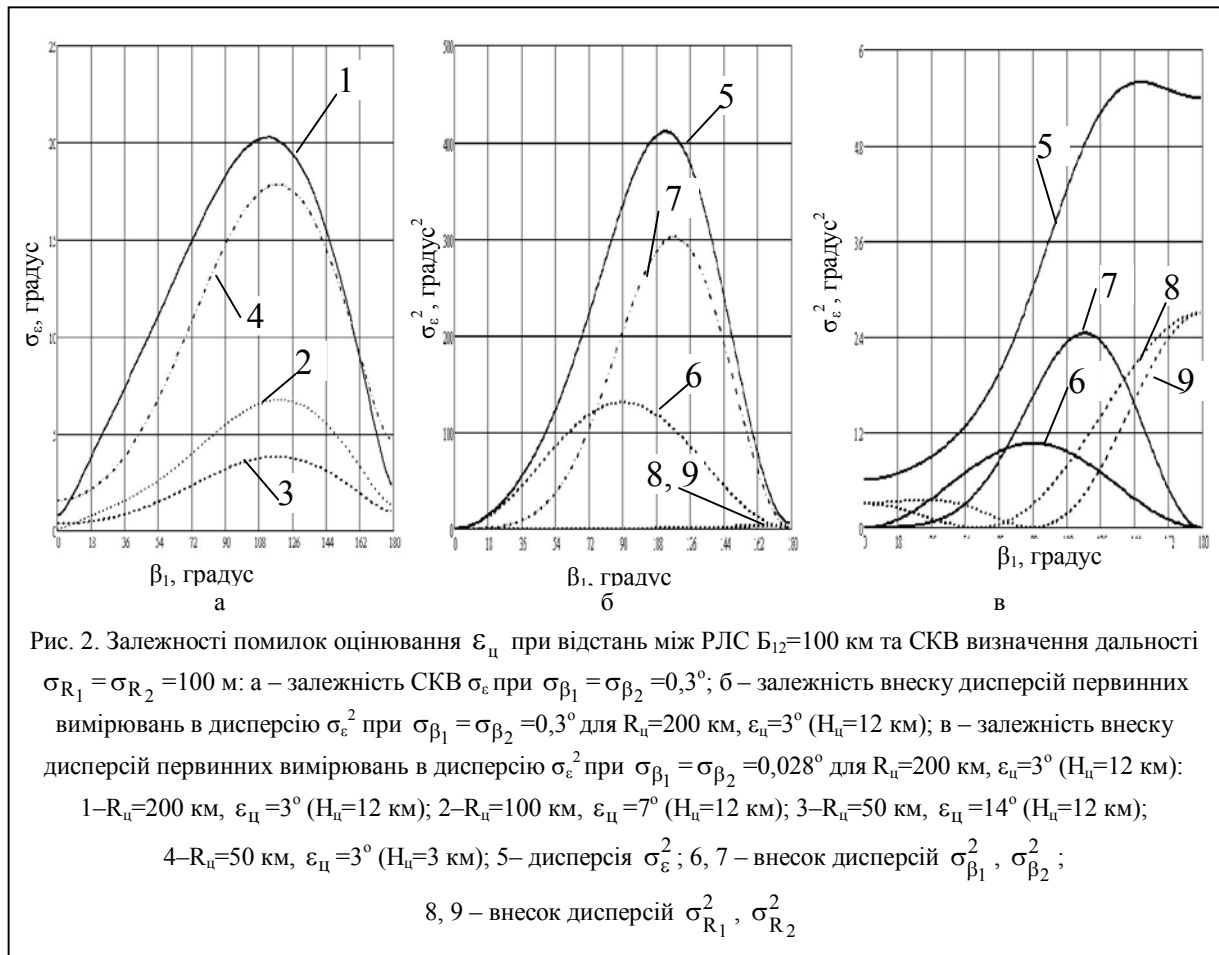
де  $L = \frac{R_1 + R_2 + \dot{A}_{12}}{2}$ .

Ці залежності не враховують помилок визначення відстані між РЛС ( $B_{12}$ ) та відповідають значенням СКВ оцінок первинних координат  $\sigma_{R1} = \sigma_{R2} = 100$  м,  $\sigma_{\beta1} = \sigma_{\beta2} = 0,3^\circ$ , які притаманні сучасним оглядовим РЛС метрового діапазону довжин хвиль. Залежності на рис. 2, а) наведені для випадків знаходження цілі на висоті 12 км на дальності 200, 100, 50 км та для цілі на дальності 50 км, висоті 3 км.

Із аналізу рис. 2, а) видно, що СКВ  $\sigma_{\varepsilon}$  зменшується із збільшенням значення кута місця, але значення  $\sigma_{\varepsilon}$  перевищує в декілька разів значення  $\varepsilon_{\delta}$ . Це свідчить про неможливість визначення  $\varepsilon_{\delta}$  та висоти цілі по РЛІ від двох РЛС в геометрії МРС (рис. 1). Причини великого значення  $\sigma_{\varepsilon}$  в розглянутій МРС пояснює рис. 2, б), де видно, що основний вклад в дисперсію  $\sigma_{\varepsilon}^2$  вносять дисперсії  $\sigma_{\beta_1}^2, \sigma_{\beta_2}^2$ .

Для вирівнювання вкладів дисперсій  $\sigma_{\beta_1}^2, \sigma_{\beta_2}^2$  із вкладом дисперсій  $\sigma_{R_1}^2, \sigma_{R_2}^2$ , СКВ оцінок азимутів повинно бути не більше  $\sigma_{\beta} \leq 0,028^\circ$ . Для цього випадку розподіл внесків дисперсій первинних вимірювань в дисперсію  $\sigma_{\varepsilon}^2$  наведено на рис. 2, в). Із аналізу рис. 2, в) видно, що навіть при підвищенні точності оцінок азимуту, СКВ  $\sigma_{\varepsilon}$  буде знаходитися у межах  $0,7 < \sigma_{\varepsilon} < 2,4^\circ$ , що також не дозволяє проводити його вимірювання.

Слід зазначити, що забезпечення значення  $\sigma_{\beta} \leq 0,028^\circ$  є досить складним при технічній реалізації, оскільки потребує використання антен досить великих габаритів (у десять разів більше ніж у сучасних РЛС метрового діапазону довжин хвиль).



Правильність проведених розрахунків перевірена за допомогою статистичного моделювання, яке здійснювалось наступним чином. Для визначених положень цілі у просторі розраховувались значення  $R_{\text{ц1}}$ ,  $\beta_{\text{ц1}}$ ,  $R_{\text{ц2}}$ ,  $\beta_{\text{ц2}}$  відносно позицій РЛС<sub>1</sub>, РЛС<sub>2</sub>. В кожному статистичному випробуванні вектор первинних вимірювань  $\lambda$  формувався шляхом додавання до цих значень випадкових величини, які розподілені за нормальним законом з параметрами  $\sigma_{R_1}$ ,  $\sigma_{\beta_1}$ ,  $\sigma_{R_2}$ ,  $\sigma_{\beta_2}$ , відповідно. Для сформованого вектору первинних вимірювань  $\lambda$  розраховувались координати цілі  $x_{\delta}$ ,  $y_{\delta}$ ,  $z_{\delta}$  за виразом (2). Результати статистичного моделювання оцінювання координат цілі в двопозиційної МРС при проведенні по 20 статистичних випробувань в кожній визначеній точки простору наведені на рис. 3.

Із аналізу рис. 2, рис. 3 видно, що результати статистичного моделювання підтверджують пра-

вильність аналітичних розрахунків та підтверджують неможливість визначення  $\epsilon_{\delta}$  (висоти цілі) у такий МРС.

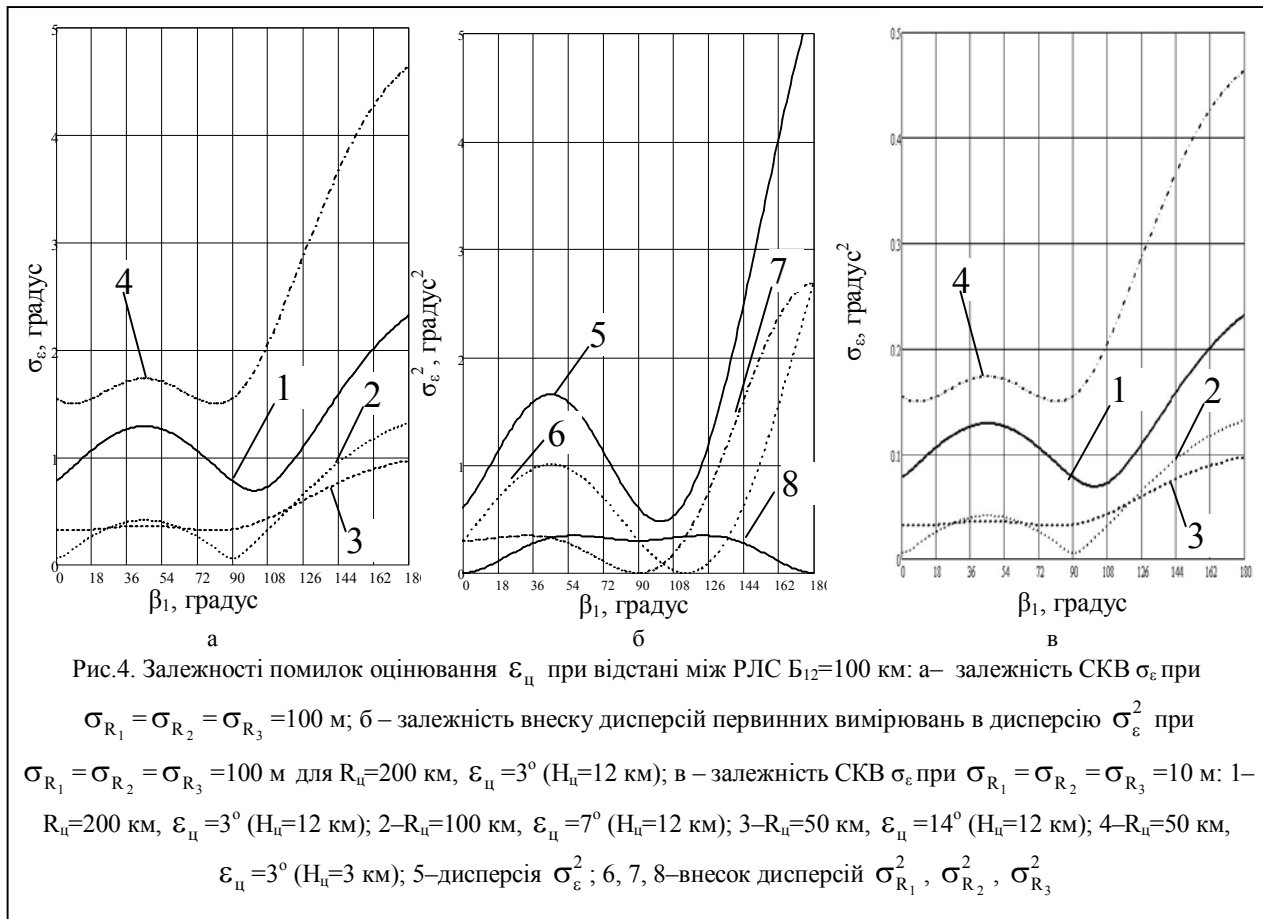
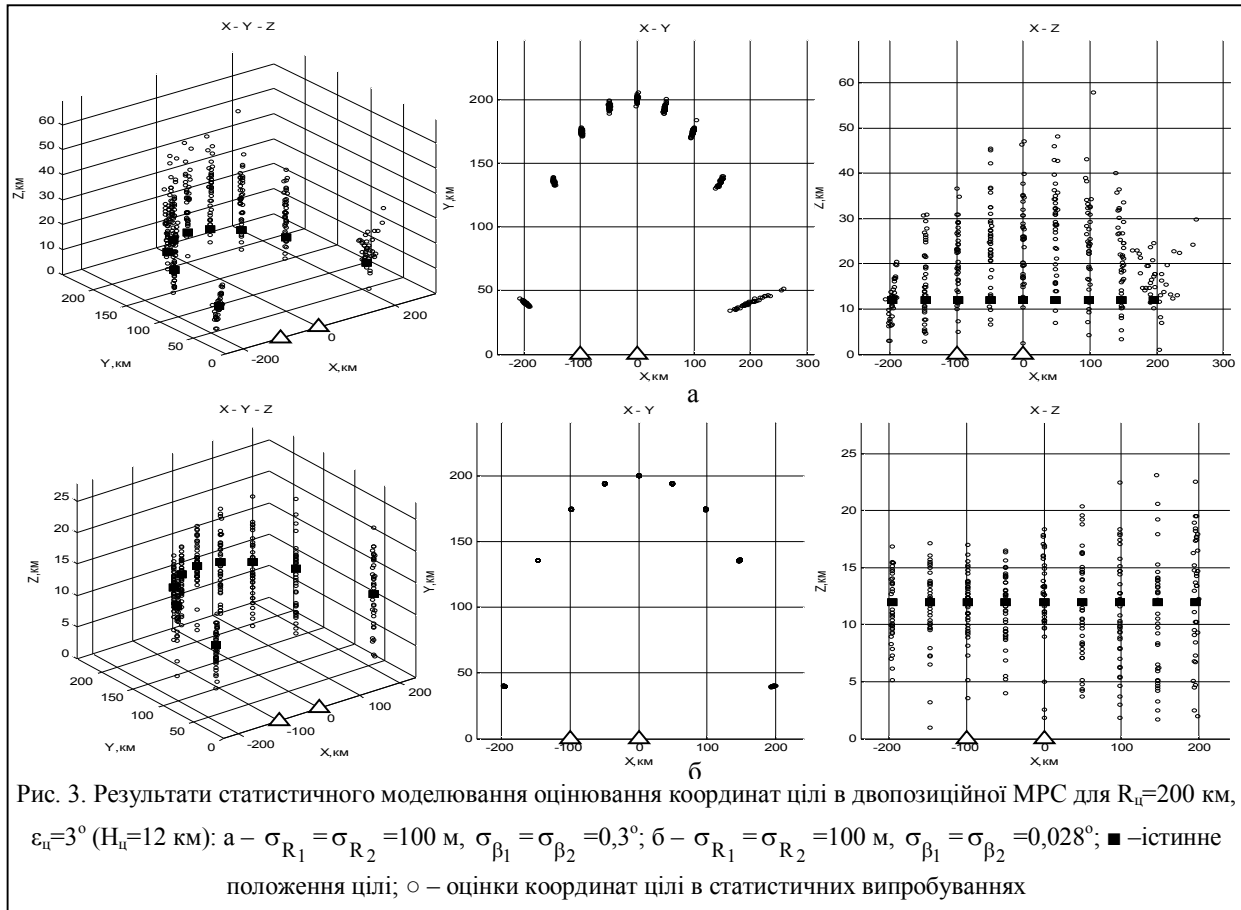
Із проведеного аналізу можливостей визначення  $\epsilon_{\delta}$  у двопозиційної МРС, яка створена сучасними активними двокоординатними оглядовими РЛС, видно, що під малими кутами місця (до  $6^\circ$ ) така система не спроможна забезпечити вимірювання  $\epsilon_{\delta}$ . Навіть при зменшенні СКВ  $\sigma_{\beta}$  у 10 разів (що потребує збільшення розмірів антен у 10 разів) можливість визначення  $\epsilon_{\delta}$  не забезпечується.

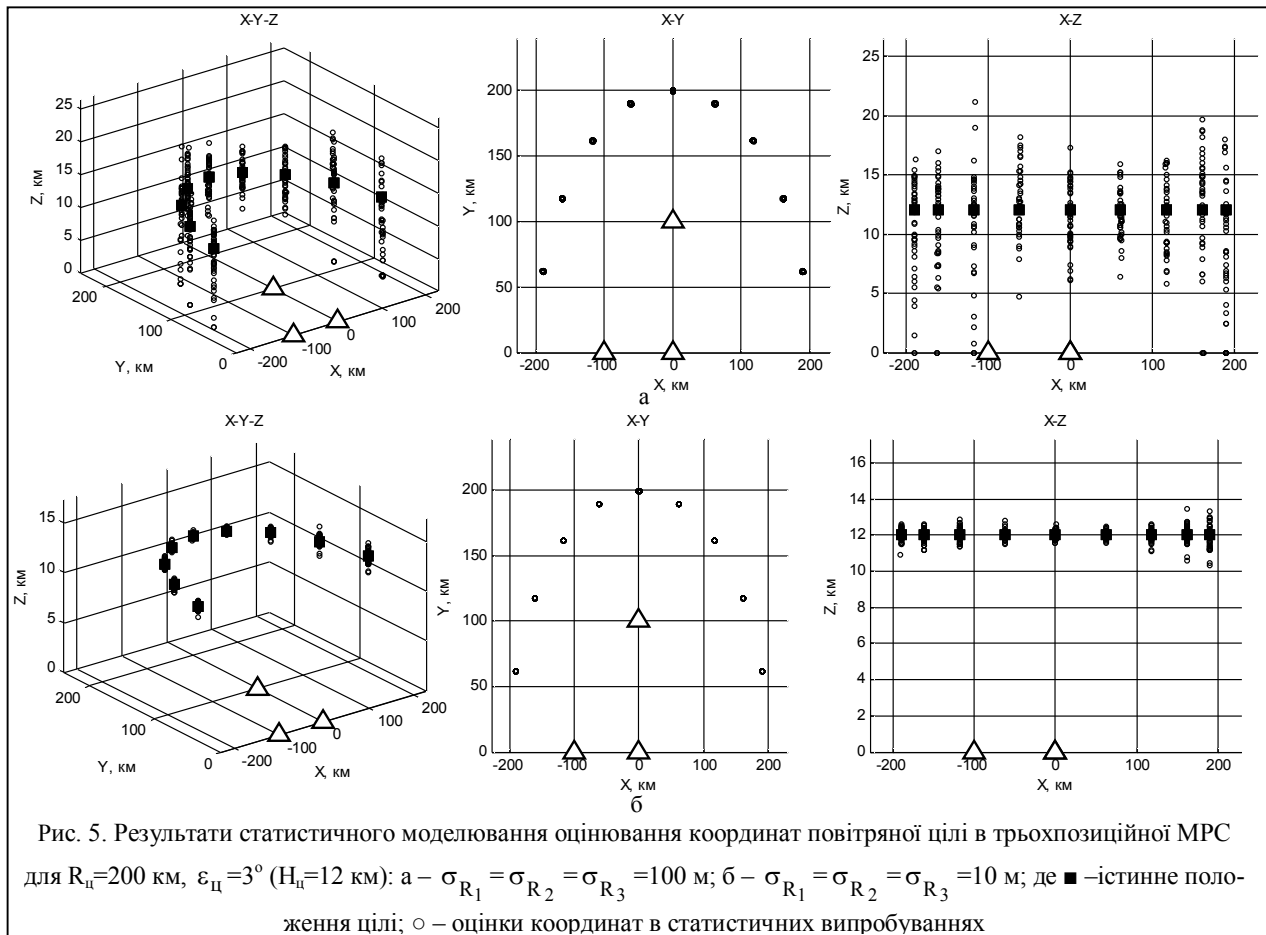
При використанні РЛІ від трьох РЛС та далекомірною методу визначення координат цілі вектор первинних вимірювань має вигляд

$$\lambda = (R_1 \ R_2 \ R_3),$$

а вираз (3) для визначення кута місця цілі має вигляд:

$$\begin{aligned} \epsilon_{\delta} (R_1, R_2, R_3, \dot{A}_{12}, \dot{A}_{13}) &= \arcsin \left( \frac{z_{\delta}}{R_1} \right) = \\ &= \arcsin \left( \sqrt{R_1^2 - \left( \frac{R_1^2 - R_2^2}{2\dot{A}_{12}} + \frac{\dot{A}_{12}}{2} \right)^2 - \left( \frac{R_1^2 - R_3^2}{2\dot{A}_{13}} + \frac{\dot{A}_{13}}{2} \right)^2} / R_1 \right). \end{aligned} \quad (6)$$





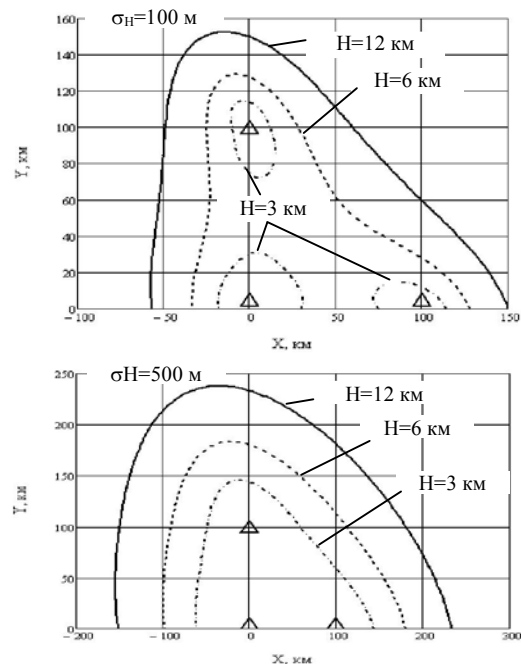
Використання далекомірного методу місцевизначення дозволяє уникнути впливу СКВ  $\sigma_{\beta}$  на кінцевий результат.

Залежності СКВ  $\sigma_{\varepsilon}$  від координат цілі ( $R_{\delta}$ ,  $\beta_{\delta}$ ,  $\varepsilon_{\delta}$ ), які розраховані за виразами (4), (6) наведені на рис. 4, а) для  $\sigma_{R_1} = \sigma_{R_2} = \sigma_{R_3} = 100$  м та на рис. 4, в) для  $\sigma_{R_1} = \sigma_{R_2} = \sigma_{R_3} = 10$  м. Ці залежності не враховують помилки визначення дальності між РЛС та відповідають випадкам знаходження цілі на висоті 12 км на дальності 200, 100, 50 км та для цілі на дальності 50 км висоті 3 км. На рис. 4, б) наведено залежність вкладів дисперсій  $\sigma_{R_1}^2$ ,  $\sigma_{R_2}^2$ ,  $\sigma_{R_3}^2$  в дисперсію  $\sigma_{\varepsilon}^2$  для випадку  $R_{ц}=200$  км,  $\varepsilon_{\delta}=3^\circ$  ( $H_{ц}=12$  км). Де видно, що вклад дисперсій первинних вимірювань приблизно рівнозначний.

Із проведеного аналізу можна зробити висновок, що визначення  $\varepsilon_{\delta}$  (висоти цілі) в MPC двокординатних оглядових РЛС можливо при використанні не менш трьох РЛС з СКВ визначення дальності не більше 10 метрів. Для визначення висоти доцільно використовувати далекомірний метод визначення координат, який дозволяє не висувати вимог до точності вимірів азимутів.

Робочі зони визначення висоти в трьохпозицій-

ної MPC при  $\sigma_{R_1} = \sigma_{R_2} = \sigma_{R_3} = 10$  м для різних значень СКВ визначення висоти  $\sigma_H$  наведено на рис. 6.



## Висновки

Таким чином, проведений аналіз можливостей МРС двокоординатних оглядових РЛС щодо визначення висоти повітряних цілей показав, що така можливість існує.

Це забезпечується при використанні далекомірного методу місцевизначення за умови, що МРС містить не менш трьох РЛС та СКВ вимірювання дальності цілі на кожній РЛС не більше 10 метрів.

При цьому забезпечується можливість створення суцільної зони вимірювання висоти з СКВ  $\sigma_H=100$  м для цілей з висотою польоту не менш 6 км, та з СКВ  $\sigma_H=500$  м для цілей з висотою польоту не менш 3 км.

Результати отримані за умови синхронного огляду простору, коли вимірювання усіх РЛС належать одному моменту часу.

Напрямоком подальших досліджень є оцінювання можливостей визначення висоти повітряних цілей в МРС при трасовій обробки РЛІ, коли здійснюється несинхронний огляд простору та результати вимірювань окремих РЛС перераховуються на єдиний момент часу за результатами трасового супроводження по визначеним моделям руху.

Слід також зазначити, що створення МРС та здійснення багатопозиційної просторово-часової обробки РЛІ можливо тільки при наявності розвинутої системи інформаційного обміну, синхронізації та єдиного координатно-часового забезпечення.

Напрямоком подальших досліджень є також аналіз впливу технічних характеристик цих систем та вимоги до них для забезпечення можливості здійснення багатопозиційної просторово-часової обробки РЛІ та сигналів з метою покращення якості місцевизначення повітряних цілей.

## Список літератури

1. LETVIS®MRT(Multi-Radar Tracker Server). [Електронний ресурс] – Режим доступу: [www.ales.sk/UserFiles/File/BMRT%20Multi-Radar%20Tracker.pdf](http://www.ales.sk/UserFiles/File/BMRT%20Multi-Radar%20Tracker.pdf).
2. Автоматизированная система УВД "XENYA", "VICTORIA". [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.aerotechnica.com.ua/Russian/xenya.html>.
3. Рабочее место диспетчера Автоматизированной Системы управления воздушным движением "Москва Консоль - 2000" [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://softaero-demo.ru/?/dispatcher\\_workplace/3f86ec15ea505](http://softaero-demo.ru/?/dispatcher_workplace/3f86ec15ea505).
4. Kącki A. Polish Automated System for Air Forces - Polish Way to Introduce Network Enabled Capability/ Andrzej Kącki// Radar Symposium, IRS 2006, Krakow, 24-26 May 2006, p.1-10. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=4337997](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4337997).
5. Лосев Ю.И. Дисциплина обслуживания потока сообщений при мультисрадарной обработке радиолокационной информации/ Ю.И. Лосев, З.З.Закиров// Системи обробки інформації: сб. наук. пр. Харк. ун-та Пов. Сил ім. В. Кожедуба. – Вип. 8(66). – X., 2007. – С.52-55.
6. Войтович С.А. Метод об'єднання інформації про повітряні об'єкти від сукупності різномісцевих джерел/ С.А. Войтович, С.Ю. Стасев, В.О. Корнеев // Системи озброєння і військова техніка: Науковий журнал Харк. ун-та Пов. Сил ім. В. Кожедуба. – Вип. 4(16). – X., 2008. – С.54-57.
7. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
8. Многопозиционные радиотехнические системы/ В.С. Кондратьев, А.Ф. Котов, Л.Н. Марков; Под ред. проф. В.В. Цветнова. – М.: Радио и связь, 1986. – 264 с.
9. Справочник по радиолокации. Под ред. М. Скольника. Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под общей ред. К.Н. Трофимова. Том.4. Радиолокационные станции и системы. Под ред. М.М. Вейсбейна, М. Сов. радио, 1978, – 376 с.

Надійшла до редколегії 8.06.2010

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. С.П. Лещенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

## О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ В МУЛЬТИРАДАРНОЙ СИСТЕМЕ ДВУХКООРДИНАТНЫХ ОБЗОРНЫХ РЛС

Ю.Н. Седышев, В.А. Тютюнник, А.Ф. Шевченко

При объединении двухкоординатных активных РЛС в мультисрадарные системы создаются условия для определения высоты воздушных объектов за счет использования многопозиционных методов местоопределения. В статье проводится анализ возможностей двухпозиционных и трехпозиционных систем, образованных двухкоординатными РЛС, относительно определения высоты воздушных объектов. Обосновываются требования к точности определения координат воздушных объектов в двухкоординатных РЛС, объединяемых в мультисрадарную систему. Результаты аналитических расчетов подтверждаются результатами статистического моделирования.

**Ключевые слова:** мультисрадарные системы, мультисрадарная обработка, многопозиционные системы

## ABOUT POSSIBILITY OF AIR OBJECTS HEIGHT FINDING BY 2D SURVEILLANCE RADARS MULTIRADAR SYSTEMS

Yu.N. Sedyshev, V.A. Tyutyunnik, A.F. Shevchenko

At integration 2D radar in multiradars systems conditions are created for air objects height finding due to use of multistation position finding methods. The analysis of possibilities of air objects height finding by two-position and three-position 2D surveillance radars systems, is conducted in the article. Accuracy requirements to 2D radars, which integration in multiradar systems, are substantiated. The results of analytical calculations are confirmed by results of statistical tests.

**Keywords:** multiradar systems, multiradar processing, multistation systems.