

УДК (621.396)

Д.А. Гриб, В.О. Тютюнник, О.В. Зайцев

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОБ'ЄДНАННЯ ДВОКООРДИНАТНИХ РЛС ЧЕРГОВОГО РЕЖИМУ В МУЛЬТИРАДАРНУ СИСТЕМУ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЗОН ВИДАЧІ БОЙОВОЇ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Наявність перекриття зон виявлення РЛС чергового режиму створює умови для об'єднання їх в мультирадарні системи та використання виникаючих системних ефектів для покращення точності визначення координат повітряних об'єктів. Розглянуто можливість використання далекомірного способу визначення координат при об'єднанні двокоординатних РЛС чергового режиму для створення зон видачі бойової радіолокаційної інформації.

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

Вступ

Постановка проблеми. Вимоги до якості радіолокаційної інформації (РЛІ) визначаються її споживачами з метою максимальної реалізації бойових можливостей та характеристик комплексів (зразків), що знаходяться на їх озброєнні. Реалізація вимог до РЛІ обмежується рядом факторів економічного та технічного характерів.

Різні завдання споживачів потребують РЛІ різної якості. Забезпечення споживачів РЛІ вищої якості вимагає значних матеріальних витрат і не завжди є економічно доцільним. Тому бойовий порядок радіолокаційних частин будується для задоволення вимог до РЛІ тільки у визначених смугах, зонах, напрямках та над важливими районами (об'єктами).

Радіолокаційне поле, яке утворюється сукупністю радіолокаційних станцій (РЛС), має різні значення показників якості по простору. Завдання виявлення цілей із заданою якістю над важливими об'єктами (районами) забезпечується за рахунок збільшення перекриття зон виявлення окремих РЛС або використання РЛС з кращими характеристиками. Це дає можливість об'єднувати окремі РЛС в мультирадарну систему (МРС) та використовувати системні ефекти МРС. Одним з них є використання далекомірного способу визначення координат повітряних об'єктів (ПО) для уточнення вимірів окремих РЛС.

Вибору способу використання системного ефекту МРС, яка утворюється двокоординатними РЛС, для підвищення точності визначення координат ПО присвячена дана робота.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням побудови та функціонування мультирадарних та багатопозиційних радіолокаційних систем вже присвячено велика кількість праць [1 – 5]. Відомі також приклади апаратурної реалізації мультирадарної обробки [6]. Але оцінювання можливостей використання системних ефектів, які утворюються при

об'єднанні двокоординатних РЛС в МРС, щодо підвищення точності РЛІ проводилось недостатньо.

Метою статті є аналіз варіанту об'єднання оглядових двокоординатних РЛС чергового режиму в МРС для підвищення точності РЛІ з використанням далекомірного способу визначення координат

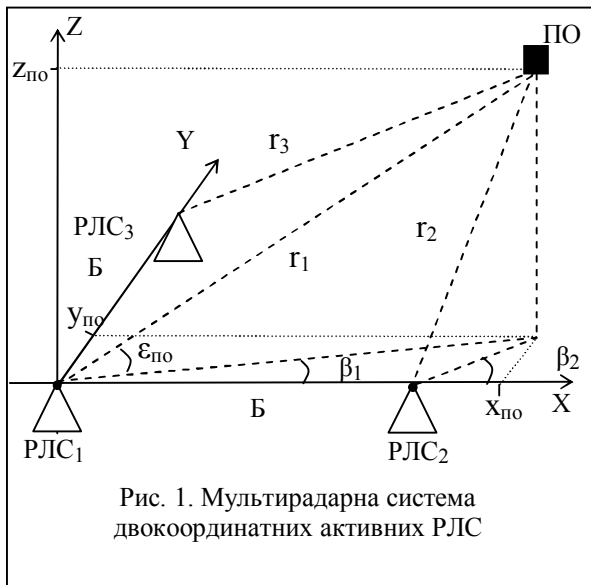
Основний матеріал

Розглянемо МРС, яка утворена просторово рознесеними двокоординатними активними оглядовими РЛС, які об'єднуються через мережу обміну даними та мають єдине координатне-часове забезпечення. Кожна РЛС вимірює дві полярні координати ПО (азимут та похилу дальність), які передаються на спільний пункт обробки, де здійснюється розрахунок просторових декартових координат. Для спрощення оцінювання потенційних можливостей МРС припустимо, що координати ПО на усіх РЛС, які утворюють МРС, вимірюються в однаковий момент часу. Це припущення не зменшує загальність аналізу можливостей МРС, оскільки на практиці воно може бути реалізоване здійсненням синхронного огляду простору або екстраполяцією координат на єдиний момент часу при трасовому супроводженні ПО.

Аналіз проведемо для МРС із трьох однакових РЛС, які рознесені на відстань B (рис. 1).

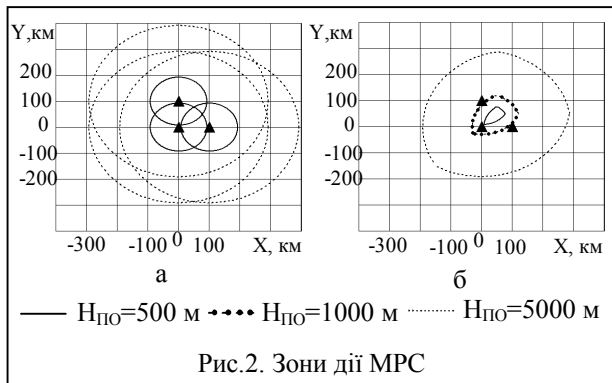
Трипозиційна МРС забезпечує можливість використання далекомірного методу для визначення просторових координат ПО. Використання цього методу дозволяє підвищити точність визначення координат ПО без зміни точності визначення кутових координат (розмірів антен) на кожній РЛС. Це дає можливість використовувати РЛС чергового режиму, які мають низьку точність визначення кутових координат ПО та не задовольняють вимогам до точності бойової РЛІ, для створення зон видачі бойової РЛІ.

Використання далекомірного методу в МРС можливо за умови, що ПО спостерігається одночасно трьома РЛС.



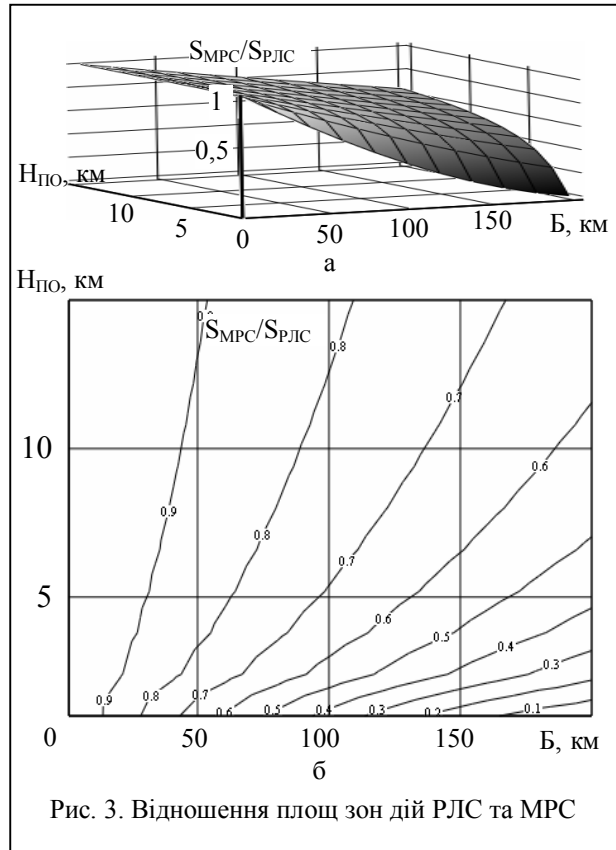
Виконання цієї умови з урахуванням кривизни землі залежить від розмірів баз B і висоти польоту ПО. Для збільшення розміру зони, де забезпечується одночасне спостереження ПО трьома РЛС, необхідно зменшувати розміри баз. З іншого боку, відомо, що для підвищення точності визначення координат ПО далекомірним методом, необхідно збільшувати розміри баз. Внаслідок цього виникає протиріччя між потенційної точністю визначення координат ПО, яка може бути забезпечена, та розміром зони дії МРС, яка використовує далекомірний метод визначення координат ПО.

На рис. 2, а наведено зони прямої радіовидимості ПО на різних висотах для РЛС, які утворюють МРС. На рис. 2, б наведені зони мультирадарної обробки, які обмежені дальністю прямої радіовидимості ПО на різних висотах (можливі зони дії МРС). На рис.2 зони наведені без врахування розмірів зон мертвих вивів РЛС.



Зона дії МРС на рис. 2, б) формується як перетин зон дії окремих РЛС (рис. 2, а)). Із аналізу рис. 2 видно, що площа зони дії МРС менше за площу зони дії окремої РЛС для відповідної висоти ПО. Залежність відношення площі зони дії МРС ($S_{МРС}$) до площі зони дії окремої РЛС ($S_{РЛС}$) від величини

баз (B) та висоти ПО ($H_{ПО}$) наведено на рис. 3. На рис.3, б) наведені контури постійного відношення $S_{МРС}/S_{РЛС}$. Із аналізу рис. 3 видно, що при розмірах баз біля 100 км та висоті ПО біля 1 км, зона дії МРС у два рази менше за зону дії окремої РЛС. Це необхідно враховувати при оцінюванні можливостей побудови суцільного радіолокаційного поля мультирадарної обробки та висування вимог до вартості МРС відносно окремої РЛС.



Проведемо порівняльний аналіз МРС із далекомірним методом та окремої РЛС щодо точності визначення координат ПО.

В МРС для визначення вектору параметрів ПО $\alpha^T(t) = (x_{по}, y_{по}, z_{по})$ використовується функціональні залежності від вектору первинних вимірювань λ , які обумовлені геометрією МРС [2]:

$$x_{по} = f_x(\lambda), y_{по} = f_y(\lambda), z_{по} = f_z(\lambda), \quad (1)$$

Положимо, що кожна i -та РЛС, яка утворює МРС (рис. 1), здійснює вимірювання похилої дальності (r_i) та азимуту (β_i) ПО. Для визначення просторових координат ПО далекомірним методом використовуються тільки оцінки похилої дальності r_i . Оцінки азимуту β_i використовуються для ототожнення вимірів r_i та усунення невизначеності. Тоді вектор первинних вимірювань МРС, який використовується для визначення вектору параметрів ПО α , буде мати вигляд:

$$\lambda = (r_1, r_2, r_3). \quad (2)$$

Вираз (1) для МРС (рис. 1), з урахуванням (2) та урахуванням впливу кривизни землі на визначення висоти ПО буде мати вигляд:

$$x_{\text{по}} = \frac{r_1^2 - r_2^2}{2B} + \frac{B}{2}; \quad y_{\text{по}} = \frac{r_1^2 - r_3^2}{2B} + \frac{B}{2};$$

$$H_{\text{по}} = \sqrt{r_1^2 - \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{2B} + \frac{B}{2}\right)^2 - \left(\frac{r_1^2 - r_3^2}{2B} + \frac{B}{2}\right)^2 + \frac{r_1^2}{2R_{3\text{екв}}}}, \quad (3)$$

де $R_{3\text{екв}} = 8500$ км – еквівалентний радіус Землі; $H_{\text{по}}$ – висота ПО відносно Землі.

У припущенні незалежності координат вектору первинних вимірювань (λ), без врахування помилок визначення розмірів баз (Б) та враховуючі малість

величини часткової похідної $\frac{\partial}{\partial r_1} \left(\frac{r_1^2}{2R_{3\text{екв}}} \right)$, серед-

ньоквадратичні помилки (СКП) визначення координат ПО в МРС визначаються виразами:

$$\sigma_x = \frac{\sigma_r}{B} \sqrt{r_1^2 + r_2^2}, \quad \sigma_y = \frac{\sigma_r}{B} \sqrt{r_1^2 + r_3^2}, \quad (4)$$

$$\sigma_H = \frac{\sigma_r}{B} \times \sqrt{\left(r_1 (r_2^2 - 2r_1^2 + r_3^2) \right)^2 + \left(r_2 (B^2 + r_1^2 - r_2^2) \right)^2 + \left(r_3 (B^2 + r_1^2 - r_3^2) \right)^2} \times \sqrt{\left(4B^2 r_1^2 - (B^2 + r_1^2 - r_2^2)^2 - (B^2 + r_1^2 - r_3^2)^2 \right)}$$

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \frac{\sigma_r}{B} \sqrt{2r_1^2 + r_2^2 + r_3^2}, \quad (6)$$

де $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_H$ – СКП визначення координат X, Y та висоти H; σ_{xy} – кругова СКП визначення місцеположення; σ_r – СКП визначення дальності.

Для окремої РЛС СКП вимірювання координат ПО визначаються відомими виразами [7]:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_r^2 + r^2 \sigma_\beta^2}; \quad (7)$$

$$\sigma_H = \sqrt{\left(r \cos(\varepsilon) \right)^2 \sigma_\varepsilon^2 + \left(\sin(\varepsilon) + \frac{r}{R_{3\text{екв}}} \right)^2 \sigma_r^2}, \quad (8)$$

де ε – кут місця ПО; $\sigma_\beta, \sigma_\varepsilon$ – СКП визначення азимуту та кута місця; r – дальність до ПО.

Відомо [7], що вимоги до припустимих СКП визначення координат ПО обумовлюється припустимими СКП цілевказування, які визначають імовірність безпошукового виявлення ПО активними засобами зенітних ракетних комплексів (ЗРК) або літаків. Значення припустимих СКП вимірювання координат

ПО для формування цілевказування типовим ЗРК не повинні перевищувати:

$$\sigma_{xy} \leq 1000 \dots 1500 \text{ м}, \quad \sigma_H \leq 700 \dots 1000 \text{ м}.$$

Значення припустимих СКП вимірювання координат ПО для наведення типових винищувачів не повинні перевищувати при наведенні в передню півсферу

$$\sigma_{xy} \leq 200 \dots 600 \text{ м}, \quad \sigma_H \leq 150 \dots 300 \text{ м},$$

при наведенні в задню півсферу

$$\sigma_{xy} \leq 500 \dots 1000 \text{ м}, \quad \sigma_H \leq 500 \dots 700 \text{ м}.$$

На рис. 4 для МРС наведено залежності кругової СКП σ_{xy} від величини бази (Б) та дальності до ПО (r_1) за умови, що СКП вимірювання дальності на кожній РЛС складає $\sigma_r = 100$ м. На рис. 4, б наведено контури постійної СКП σ_{xy} . На рис. 4, б видно, що при СКП вимірювання дальності $\sigma_r \leq 100$ м МРС здатна забезпечити вимірювання площинних координат ПО з кругової СКП $\sigma_{xy} \leq 500$ м на відстанях до 200 км при базах не більше 80 км.

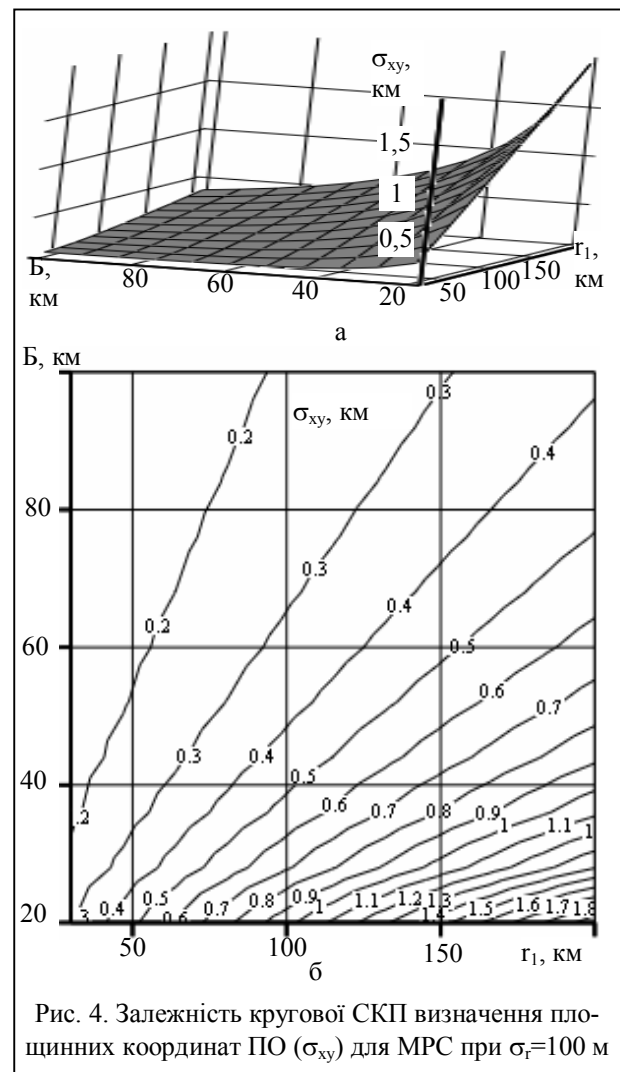


Рис. 4. Залежність кругової СКП визначення площинних координат ПО (σ_{xy}) для МРС при $\sigma_r = 100$ м

Порівняння робочих зон МРС та окремої РЛС, в яких забезпечується кругова СКП $\sigma_{xy} \leq 500$ м, наведено на рис. 5. Із аналізу рис. 5 видно, що об'єднання РЛС, які забезпечують СКП вимірювання азимуту $\sigma_\beta \leq 0,1^\circ$ при СКП вимірювання дальності $\sigma_r = 100$ м, в МРС, яка використовує далекомірний метод, недоцільно. Оскільки розмір робочої зони МРС у даному випадку менше за розмір робочої зони окремої РЛС. Але при об'єднанні РЛС, які мають $\sigma_\beta \geq 0,3^\circ$ при $\sigma_r = 100$ м, спостерігається суттєвий вигреш МРС у розмірі робочої зони відносно окремої РЛС.

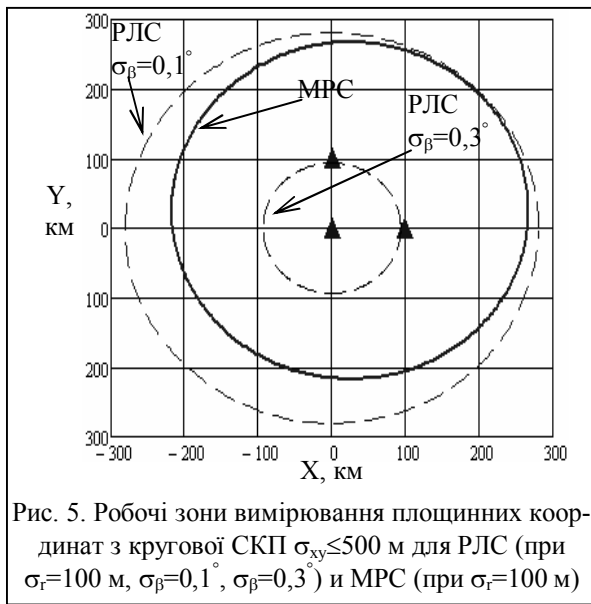


Рис. 5. Робочі зони вимірювання площинних координат з кругової СКП $\sigma_{xy} \leq 500$ м для РЛС (при $\sigma_r = 100$ м, $\sigma_\beta = 0,1^\circ$, $\sigma_\beta = 0,3^\circ$) і МРС (при $\sigma_r = 100$ м)

При порівнянні робочих зон (рис. 5), видно, що існують граничні значення СКП вимірювання координат ПО на окремої РЛС ($\sigma_{r,гр}$, $\sigma_{\beta,гр}$), які визначають доцільність об'єднання окремих двокоординатних РЛС в МРС з метою підвищення точності визначення площинних координат ПО. При об'єднанні окремих РЛС, які мають граничні значення СКП ($\sigma_{r,гр}$, $\sigma_{\beta,гр}$) в МРС, робочі зони визначення площинних координат окремої РЛС та МРС приблизно співпадають.

Залежність граничних значень $\sigma_{r,гр}$ та $\sigma_{\beta,гр}$ від параметрів МРС знайдемо з виразів (6), (7). Дорівнявши СКП σ_{xy} , яка забезпечується МРС (6), та СКП σ_{xy} , яка забезпечується РЛС (7), отримаємо:

При порівнянні робочих зон (рис. 5), видно, що існують граничні значення СКП вимірювання координат ПО на окремої РЛС ($\sigma_{r,гр}$, $\sigma_{\beta,гр}$), які визначають доцільність об'єднання окремих двокоординатних РЛС в МРС з метою підвищення точності визначення площинних координат ПО. При об'єднанні окремих РЛС, які мають граничні значення СКП ($\sigma_{r,гр}$, $\sigma_{\beta,гр}$) в МРС, робочі зони визначення площинних координат окремої РЛС та МРС приблизно співпа-

дають. Залежність граничних значень $\sigma_{r,гр}$ та $\sigma_{\beta,гр}$ від параметрів МРС знайдемо з виразів (6), (7). Дорівнявши СКП σ_{xy} , яка забезпечується МРС (6), та СКП σ_{xy} , яка забезпечується РЛС (7), отримаємо:

$$\left(\frac{\sigma_r}{\sigma_\beta} \right)_{гр} = 0.017 \sqrt{\frac{B^2 \Gamma_1^2}{2\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2 + \Gamma_3^2 - B^2}}, \quad (9)$$

де σ_β задається в градусах.

Залежність контурів постійного значення граничного відношення $(\sigma_r/\sigma_\beta)_{гр}$ від мінімальної дальності до межі робочої зони (Γ_1) та розмірів баз B наведено на рис. 6.

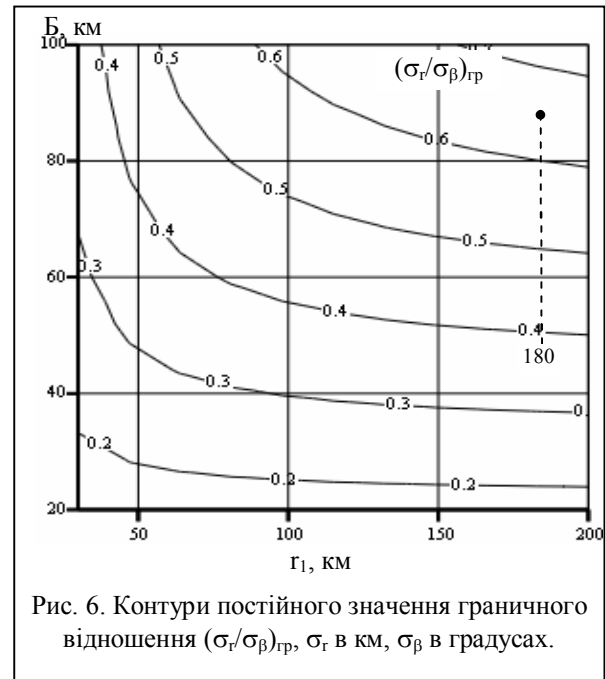
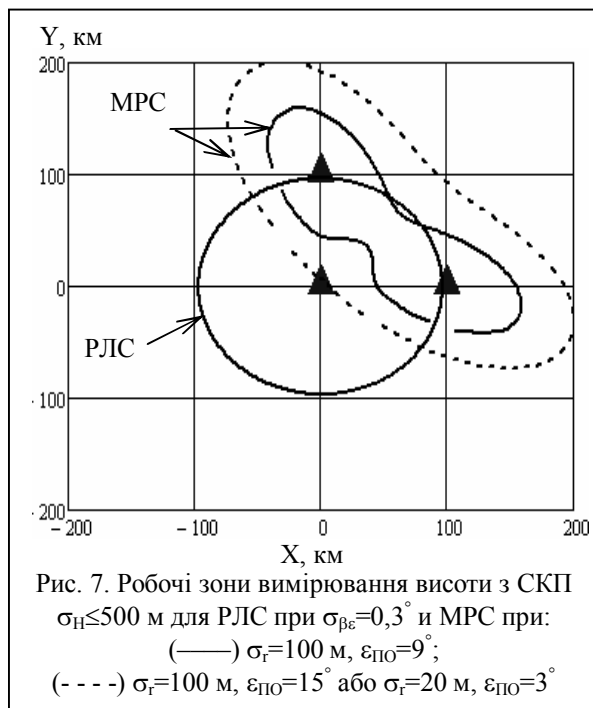


Рис. 6. Конттури постійного значення граничного відношення $(\sigma_r/\sigma_\beta)_{гр}$, σ_r в км, σ_β в градусах.

У випадку, коли відношення СКП (σ_r/σ_β) , яке забезпечує окрема РЛС, менше за значення $(\sigma_r/\sigma_\beta)_{гр}$, що наведено на рис. 6, то об'єднання РЛС в МРС забезпечує збільшення розмірів робочої зони вимірювання площинних координат. В іншому випадку розміри робочої зони не збільшуються та об'єднання РЛС в МРС для вирішення цієї задачі недоцільно.

Пояснимо рис. 6. Припустимо, що МРС створено з РЛС, які забезпечують СКП вимірювання дальності ПО $\sigma_r = 0,1$ км. Розміри баз складають $B = 80$ км. Нехай мінімальна відстань від РЛС₁ до межі робочої зони складає $\Gamma_1 = 180$ км. Тоді граничне значення відношення складає $(\sigma_r/\sigma_\beta)_{гр} = 0,6$ (рис. 6). Це означає, що для створення МРС доцільно об'єднувати РЛС для яких виконується умова $(\sigma_r/\sigma_\beta) < 0,6$. Тобто при $\sigma_r = 100$ м СКП вимірювання азимуту повинно складати більше $\sigma_\beta > 0,15^\circ$.

Робочі зони вимірювання висоти ПО для МРС та окремої РЛС наведені на рис. 7.



Із аналізу рис. 7 видно, що при створенні МРС із РЛС, які мають СКП вимірювання дальності $\sigma_r = 100$ м, вимірювання висоти забезпечується тільки для ПО, які знаходяться під досить великими кутами місця (не менш $\varepsilon_{\text{ПО}} \geq 9^\circ$). При цьому визначення висоти ПО за допомогою МРС можливо тільки в окремому секторі. При зменшенні СКП вимірювання дальності до $\sigma_r = 20$ м забезпечується вимірювання висоти ПО, які знаходяться під кутом місця $\varepsilon_{\text{ПО}} \geq 3^\circ$. Для ПО, які знаходяться під більшими кутами місця, забезпечується збільшення розмірів робочої зони вимірювання висоти.

Висновки

Об'єднання оглядових РЛС в МРС для підвищення точності вимірювання координат ПО та створення зон видачі бойової РЛІ можливо при використанні далекомірною способу уточнення вимірів.

Суттєвий виграв у підвищенні точності РЛІ дає об'єднання РЛС чергового режиму.

В межах зони дії МРС, яка створена з РЛС чергового режиму, можливо утворювати зони РЛІ з підвищеною точністю, яка відповідає вимогам до бойової інформації. Місце її утворення залежить від конфігурації розміщення окремих РЛС. Тому вибір місць розташування окремих РЛС доцільно обирати з урахуванням потреб в таких зонах.

Оптимізація розташування окремих РЛС чергового режиму, які об'єднуються в МРС, з метою забезпечення створення зон видачі бойової РЛІ та оцінювання можливостей практичної реалізації запропонованого способу є напрямком подальших досліджень.

Список літератури

1. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 416 с.
2. Кондратьев В.С. 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.
3. Фарина А. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей: Пер. с англ / А. Фарина, Ф. Студер – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
4. Лосев Ю.И. Дисциплина обслуживания потока сообщений при мультирадарной обработке радиолокационной информации / Ю.И. Лосев, З.З. Закиров // Системы обработки информации: сб. науч. пр. Харк. ун-та Пов. Сил ім. В. Кожедуба. – Вып. 8(66). – X., 2007. – С. 52–55.
5. Li J. MIMO Radar Signal Processing / J. Li, P. Stoica – Wiley-IEEE Press, 2008. – 448 p.
6. LETVIS@MRT(Multi-Radar Tracker Server) [Електронний ресурс] – Режим доступу: www.ales.sk/User-Files/File/BMRT%20Multi-Radar%20Tracker.pdf.
7. Основы построения радиолокационного вооружения РТВ / Под редакцией В.В. Литвинова. – Х.: ВИРТА ПВО. – 1986. – 348 с.

Надійшла до редколегії 12.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Р.Е. Пашенко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

ОБЪЕДИНЕНИЕ ДВУХКООРДИНАТНЫХ РЛС ДЕЖУРНОГО РЕЖИМА В МУЛЬТИРАДАРНУЮ СИСТЕМУ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЗОН ВЫДАЧИ БОЙОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Д.А. Гриб, В.А. Тютюнник, А.В. Зайцев

Наличие перекрытия зон обнаружения РЛС дежурного режима создает условия для объединения их в мультирадарные системы та использования возникающих системных эффектов для улучшения точности определения координат воздушных объектов. Рассмотрена возможность использования дальномерного способа определения координат при объединении двухкоординатных РЛС дежурного режима для создания зон выдачи бойовой радиолокационной информации.

Ключевые слова: мультирадарные системы, многопозиционные системы, мультирадарная обработка.

INTEGRATION 2D SURVEILLANCE RADARS IN MULTIRADAR SYSTEM FOR COMBAT RADAR INFORMATION ZONE CREATION

D.A. Grib, V.A. Tyutyunnik, A.V. Zaytsev

Crossing of surveillance radars areas creates conditions for integration them in the multiradar systems that the use of nascent system effects for the increase of exactness of determination of position of air objects. Possibility of the use of range-finder method for determination air objects position when 2D surveillance radars is integrated for combat radar information zone creation is considered.

Keywords: multiradar systems, radar information zone creation.