

УДК 519.81:681.51

С.В. Ковбасюк<sup>1</sup>, В.І. Стефанович<sup>2</sup><sup>1</sup>Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова  
Національного авіаційного університету, Житомир<sup>2</sup>Департамент проведення охоронних заходів Управління державної охорони України, Київ

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДИСЛОКАЦІЇ РЛС В БАГАТОПОЗИЦІЙНОМУ РАДІОЛОКАЦІЙНОМУ КОМПЛЕКСІ

З метою аналітичного розв'язання задачі структурної оптимізації багатопозиційного радіолокаційного комплексу використаний метод багатокритеріальної оптимізації за нелінійною схемою компромісів проф. Вороніна А.М. Розроблена методика оптимального розміщення на місцевості елементів багатопозиційного радіолокаційного комплексу на базі радіолокаційних станцій з автономним прийомом.

**Ключові слова:** координати дислокації, багатопозиційний радіолокаційний комплекс.

### Вступ

Головною задачею космічної діяльності в інтересах безпеки і оборони є завчасне виявлення ознак військових загроз безпеці України. У зв'язку з цим актуальною постає наукова і практична задача – оцінювання космічної обстановки в інтересах інформаційно-розвідувального забезпечення Збройних сил України.

Згідно Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2008 – 2012 роки пріоритетами заходів щодо виконання завдання “Проведення космічної діяльності в інтересах національної безпеки і оборони” є ефективне використання науково-технічного потенціалу та можливостей, які надає космічна діяльність. Заходами щодо виконання завдання “Забезпечення розвитку наземної інфраструктури” передбачено модернізацію технічних засобів наземного сегмента космічної системи та системи контролю і аналізу космічної обстановки (СКАКО) [1]. Результатом роботи СКАКО повинен стати каталог космічних об'єктів (КО), основою якого є початкові умови (ПУ) руху КО. Знаходження ПУ руху КО проводиться шляхом статистичної обробки траєкторних вимірювань. Виходячи з того, що РЛС СКАКО – це складна радіотехнічна система масового обслуговування, математичне забезпечення функціонування якої вимагає зменшення обчислювальних витрат на проведення всіх її одиничних операцій, на алгоритми траєкторної обробки в РЛС СКАКО додатково, крім точнісних вимог, накладається вимога оперативності їх роботи.

Складність ведення каталогу КО полягає в отримання в стислі терміни балістико-навігаційних даних, від оперативності видачі і достовірності яких залежить вирішення завдань споживачами інформації, які представлені оборонними, політичними і економічними структурами держави. Таким чином, оперативне отримання високоточної інформації про

параметри руху КО на основі розробки методичного і математичного забезпечення функціонування інформаційних засобів СКАКО складають суть проблеми, що вимагає вирішення.

**Аналіз останніх досліджень.** Одним з перспективних шляхів удосконалення засобів спостереження за КО з метою оперативного отримання високоточних оцінок параметрів руху цілей є інформаційне об'єднання декількох автономних вимірювачів у багатопозиційні радіолокаційні комплекси (БП РЛК). Під БП РЛК розуміється радіотехнічна система, що складається з радіолокаційних станцій (РЛС) спостереження за КО, де спільна обробка інформації здійснюється на засобах Центру контролю космічного простору. База між РЛС сумірна з дальністю до КО, що супроводжуються. Одною з переваг побудови великобазових некогерентних БП РЛК на базі автономних активних РЛС є отримання даних про ціль з різних, просторово суттєво рознесених напрямів, що дає можливість значно підвищити точність визначення параметрів руху КО при будь-якому варіанті об'єднання інформації з позицій в БП РЛК [2, 3].

Розгляду структури багатопозиційних (багатоканальних) комплексів приділено багато робіт. Однак вони або розглядають малобазові системи, або базуються на статистичному моделюванні, що потребує значних обчислювальних витрат, або розглядають обмежену кількість параметрів, які характеризують роботу комплексу. Так, в [4] розглянуті підходи до побудови малобазових пасивних радіолокаційних систем, де відстань до цілі набагато більша за бази між РЛС. У цьому випадку робиться висновок, що найкращим є варіант шести приймальних пунктів в кутах правильного багатокутника з додатковим центральним пунктом прийому. Аналогічний висновок був отриманий шляхом моделювання багатоканальної приймальної системи з єдиним фазовим центром. Зважаючи на інший клас роз-

глянутих систем, можна зробити висновок, що отримані результати не можна безпосередньо перенести на активні великобазові БП РЛК. В [5] розглянуто варіант оптимізації структури активного великобазового БП РЛК, де аналізується точність визначення параметрів руху КО від кількості РЛС в БП РЛК. При розгляді задачі в якості обмеження було прийнято розміщення РЛС в кутах правильних багатокутників.

Таким чином, можна констатувати, що загального підходу до структурної оптимізації великобазових БП РЛК не розроблено і потребує подальших досліджень.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є розробка методики визначення координат оптимальної дислокації РЛС активного багатопозиційного радіолокаційного комплексу.

### Виклад основного матеріалу

БП РЛК є складною системою, яка, зазвичай, характеризується суперечними властивостями. Оцінювання і оптимізація таких складних систем здійснюється на основі багатокритеріальних підходів. При формалізації розв'язку багатокритеріальних задач керуються різними принципами, беручи до уваги набір індивідуальних переваг, який формально відображається функцією корисності в критеріальному просторі або схемою компромісів (скалярною згортокою векторного критерію) [6]. Поставимо задачу апроксимації функції корисності моделлю на всій області визначення в критеріальному просторі, виходячи з принципу «подалі від обмежень» [6]. Такий підхід передбачає, що до розгляду вводяться тільки кількісні критерії.

Компромісно-оптимальним рішенням на основі скалярної згортки за нелінійною схемою компромісів у відповідності з простою змістовною моделлю функції корисності при мінімізуємих критеріях є вираз [7, 8]:

$$\chi^* = \arg \min_{\chi \in G} \sum_{k=1}^d \gamma_k [1 - \psi_{0k}(\chi)]^{-1}, \quad (1)$$

де  $\chi$  – параметр, що оптимізується;

$G$  – область визначення функції частинних критеріїв оптимальності;

$\gamma_k$  – коефіцієнт важливості (вага)  $k$ -ї критеріальної функції;

$\psi_{0k}(\chi)$  – нормована  $k$ -та частинна критеріальна функція;

$d$  – кількість частинних критеріїв;

$\chi^*$  – оптимальне значення шуканого параметру

У такому вигляді згортка (1) передбачає аналітичний опис частинних критеріїв оптимальності  $\psi_{0k}(\chi)$ , для чого необхідно реалізувати наступне:

сформувати частинні критерії;

вибрати параметр оптимізації (задати параметр системи, що підлягає оптимізації);

отримати аналітичну залежність критеріїв оптимальності від параметра, що оптимізується;

задати область пошуку рішення (обмеження задачі).

Для розв'язку задачі визначення координат дислокації вимірювачів в БП РЛК сформуємо частинні критерії якості, що відображають вплив структури комплексу на ефективність його роботи і є залежними від параметрів, що оптимізуються, – географічних координат дислокації вимірювачів.

Для високоточного визначення параметрів руху КО в БП РЛК необхідно знайти оцінку траєкторних параметрів об'єкта  $\hat{X}_0 = L_{\text{тр.обр.}}^{\text{БП РЛК}}(Y)$ , а саме:

використовуючи:

$$\text{динамічну модель руху КА} - \dot{X} = f(X),$$

$$\text{рівняння вимірювання} - Z = \phi(X),$$

вибірки вимірювань координат КО вимірювачами БП РЛК в пунктової системі координат –

$$Y_1 = (y_1, \dots, y_{k-m}), \dots; \quad Y_j = (y_1, \dots, y_{l-m}), \dots;$$

$$Y_n = (y_1, \dots, y_{s-m});$$

часову сітку, на якій проведені вимірювання, –

$$T_{\Sigma} = (t_1, \dots, t_{k+...l+...s}),$$

кореляційні матриці похибок (КМП) вимірювань –  $K_{Y_j} = \text{diag}(K_{Y_j})$ ,

потрібно:

у випадку об'єднання інформації, наприклад, на рівні одиничних вимірювань – знайти методом Ньютона із записаної на основі методу найменших квадратів багатоточкової крайової задачі оцінку вектора початкових умов руху КО, наприклад, в геоцентричній абсолютній системі координат  $\hat{X}_0$ :

$$\begin{aligned} X_0^{i+1} = X_0^i - & \left[ \left( \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right]^T \cdot K_{Y_j}^{-1} \cdot \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right) \right] \times \\ & \times \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right]^T \cdot K_{Y_j}^{-1} \cdot (Y_j - Z_j(X_0)) \Bigg]_{X_0^i}. \end{aligned} \quad (2)$$

де  $L_{\text{тр.обр.}}^{\text{БП РЛК}}(Y)$  – алгоритм обробки траєкторної інформації в БП РЛК;  $n$  – кількість РЛС в БП РЛК;  $m$  – кількість вимірюваних координат.

Точність визначення положення КО в БП РЛК характеризується кореляційною матрицею похибок оцінювання

$$K_{\hat{X}_0} = \left( \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right]^T \cdot K_{Y_j}^{-1} \cdot \frac{\partial Z_j}{\partial X_0} \right)^{-1}, \quad (3)$$

яка є результатом перетину просторових еліпсоїдів похибок визначення положення об'єкту супроводження кожною з  $n$  РЛС комплексу в пунктовій системі координат. При перерахунку кожної КМП  $K_{Y_j}$  з використанням часткових похідних  $\frac{\partial Z}{\partial X_0}$  враховується

географічне положення кожного вимірювача.

Отже, отримана функціональна залежність точнісних характеристик визначення початкових умов руху КО від параметрів, що оптимізуються. Розміри результуючого еліпсоїда (загальної області перетину еліпсоїдів від елементів БП РЛК) за постійних інших умов залежать від взаємного розташування (ракурсу на ціль) вимірювачів, тобто від географічних координат їх дислокації. Отже, змінюючи розташування інформаційних засобів (параметр  $\phi_i, \lambda_i, i = 1..n$ ) можна добитися найменших розмірів області перетину парціальних еліпсоїдів – найкращої точності визначення координат КО, що є ознакою і результатом формування оптимальної просторової структури БП РЛК.

Скалярну міру точності оцінювання просторового положення КО по КМП можна обрати декількома підходами. Для розв'язання поставленої задачі – пошуку оптимального географічного положення РЛС – оберемо визначник КМП, який характеризує просторовий об'єм похибок оцінювання координат КО. Таким чином маємо перший частинний критерій для формування оптимальної структури БП РЛК шляхом визначення географічних координат точок дислокації вимірювачів:

$$\det K_{\hat{X}_0} = f(\lambda_i, \phi_i) \rightarrow \min, \quad i = 1..n. \quad (4)$$

Другий чинник, який впливає на якість отриманих оцінок параметрів руху КО, це відстань РЛС одна від одної, тобто формування великих баз для спостереження за КО з різних просторових напрямів як характерної риси великобазового БП РЛК. Зважаючи на те, що існуючі в Україні РЛС супроводжують низькоорбітальні КО, можна вважати за доцільне створення максимально можливих баз, враховуючи територіальні обмеження України, і висування умови максимізації площі багатокутника, у кутах якого дислоковані РЛС БП РЛК. Для прикладу обмежимося трьома вимірювачами. Площа сферичного трикутника на поверхні Землі визначається виразом [9]

$$S = R_3^2 \sigma = f(\lambda_i, \phi_i), \quad i = 1..3, \quad (5)$$

де  $R_3$  – радіус Землі;  $\sigma$  – сферичний надлишок.

Таким чином, другий частинний критерій оптимальності для просторової структури БП РЛК:

$$S_{\text{БПРЛК}} = f(\lambda_i, \phi_i) \rightarrow \max, \quad i = 1..n. \quad (6)$$

За результатами вище викладеного отримаємо систему критеріїв оптимальності просторової структури БП РЛК

$$\begin{cases} \det K_{\hat{X}_0}(\lambda_i, \phi_i) \rightarrow \min \\ S_{\text{БПРЛК}}(\lambda_i, \phi_i) \rightarrow \max \end{cases}, \quad \lambda_i, \phi_i - \text{var}, \quad i = 1..n \quad (7)$$

Суперечність частинних критеріїв оптимальності просторової структури БП РЛК є ознакою зведення початкового завдання до багатокритеріальної форми на базі аналогових моделей критерійних функцій. Згідно виразу (1) маємо узагальнений функціонал для пошуку координат дислокації вимірювачів оптимальної просторової структури БП РЛК:

$$\begin{aligned} \chi^* = \arg \min & [\Gamma_1 (1 - \det K_{0\hat{X}_0}(\lambda_i, \phi_i))^{-1} + \\ & + \Gamma_2 (1 - S_{\text{БПРЛК}}(\lambda_i, \phi_i))^{-1}]. \end{aligned} \quad (8)$$

Уведені нульові індекси у позначеннях частинних критеріїв оптимальності просторової структури БП РЛК характеризують їх нормування [Воронин]. У даному випадку нормування частинних критеріїв має додаткове навантаження врахування обмежень території дислокації вимірювачів, які також використовуються при встановленні меж інтервалу чисельного розв'язку нелінійного рівняння, отриманого для пошуку оптимізованої структури БП РЛК.

Оптимальні значення параметрів  $\lambda_i^*, \phi_i^*$  – географічні координати точок дислокації вимірювачів – знаходяться шляхом розв'язку системи рівнянь виду

$$\frac{\partial \chi^*}{\partial \lambda_i} = 0; \quad \frac{\partial \chi^*}{\partial \phi_i} = 0. \quad (9)$$

Для розв'язку системи рівнянь (9) застосовується один з відомих числових методів, наприклад, метод Ньютона [10].

Для демонстрації можливостей та оцінки працездатності запропонованого підходу розглянемо наступний приклад.

Необхідно визначити оптимальну просторову структуру БП РЛК, який повинен забезпечувати високоточне визначення параметрів орбіт КО типу «Січ-1». Багатопозиційну систему формуватимуть засоби, тактико-технічні характеристики яких відповідають РЛС 5Н86 [11]. У вихідних даних прийняті наступні припущення. Оптимальна кількість вимірювачів в системі складатиме три, відомі також координати дислокації двох радіолокаційних станцій, першої  $\lambda_1 = 48,5^0$ ,  $\phi_1 = 22,8^0$  (поблизу м. Мукачеве), другої  $\lambda_2 = 44,6^0$ ,  $\phi_2 = 33,4^0$  (поблизу м. Севастополь).

Для проведення розрахунків була створена математична модель в середовищі символічної математики Maple. За умов рівноправності частинних критеріїв результати обчислень координати дислокації третього вимірювача становлять

$$l^* = 53,8^0; \quad \phi^* = 33,4^0,$$

що відповідає структурі БП РЛК, складеної з трьох вимірювачів у вигляді, наближеному до правильно-го трикутника.

Урахування обмежень на територію дислокації вимірювачів державним кордоном України дає розв'язок задачі визначення координат дислокації трього вимірювального пункту БП РЛК у вигляді

$$l^* = 52,2^0; \quad \phi^* = 33,5^0.$$

Зважаючи на необхідність наявності розвинених транспортних комунікацій та інфраструктури для функціонування РЛС, доцільним є розміщення РЛС поблизу населених пунктів Шостка, Воронеж, або Ямпіль Сумської області.

### Висновки

З метою аналітичного розв'язання задачі структурної оптимізації БП РЛК використаний метод багатокритеріальної оптимізації за нелінійною схемою компромісів професора Вороніна А.М. Розроблена методика визначення місць дислокації елементів БП РЛК дозволяє формувати оптимальну структуру БП РЛК за просторовою конфігурацією. При цьому враховуються тактико-технічні характеристики окремих вимірювачів, їх взаємне розташування, ракурс на ціль і обмеження території держави.

Аналіз отриманих результатів математичного моделювання доводить, що оптимізована просторова структура БП РЛК наближена до рівностороннього трикутника і підтверджує попередні висновки статистичного моделювання [5].

### Список літератури

1. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008-2012 роки / Національне

космічне агентство України. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nkau.gov.ua/nsau/catalogNEW.nsf>. – 5.03.2009. – Загол. з екрану.

2. Ковбасюк С.В. Оценивание точности определения пространственного положения лоцируемого объекта в многопозиционных РЛС / С.В. Ковбасюк, В.И. Шестаков // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1999. – № 10. – С. 18-23.

3. Ковбасюк С.В. Алгоритм объединения информации о параметрах движения космического аппарата в активном многопозиционном радиолокационном комплексе / С.В. Ковбасюк, В.И. Стефанович // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ. – 2007. – № 2(41). – С. 90-95.

4. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 415 с.

5. Ковбасюк С.В. Методика оптимізації вибору параметрів структури багатопозиційного радіолокаційного комплексу / С.В. Ковбасюк, О.О. Писарчук // Проблеми управління та інформатики. – 2003. – № 6. – С. 120-128.

6. Воронин А.Н. Системный анализ и многокритериальная оценка космических проектов экспертными методами / А.Н. Воронин // Проблеми управління та інформатики. – 2004. – № 1. – С. 121-135.

7. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем / А.Н. Воронин. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.

8. Сложные технические и эргатические системы: метод использования / А.Н. Воронин, Ю.К. Зиятдинов, А.В. Харченко, В.В. Остапьевский. – Х.: Факт, 1997. – 240 с.

9. Справочник авиационного штурмана / Под ред. В.И. Соколова. – М.: Воен. издат. МО СССР, 1957. – 416 с.

10. Самарский А.А. Численные методы: учеб. пособие для вузов / А.А. Самарский, А.В. Гулин. – М.: Наука, 1989. – 432 с.

11. Радиотехнические станции надгоризонтного обнаружения войск ПРН: учебн. / Под ред. Ф.М. Андреева. – Х.: ВИРТА, 1983. – 444 с.

Надійшла до редколегії 16.01.2009

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

### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ДИСЛОКАЦИИ РЛС В МНОГОПОЗИЦИОННОМ РАДИОЛОКАЦИОННОМ КОМПЛЕКСЕ

С.В. Ковбасюк, В.И. Стефанович

С целью аналитического решения задачи структурной оптимизации многопозиционного радиолокационного комплекса использован метод многокритериальной оптимизации за нелинейной схемой компромиссов проф. Воронина А.М. Разработана методика оптимального размещения на местности элементов многопозиционного радиолокационного комплекса на базе радиолокационных станций с автономным приемом.

**Ключевые слова:** координаты дислокации, многопозиционный радиолокационный комплекс.

### METHOD OF DETERMINATION OF CO-ORDINATES OF DISTRIBUTION RADAR IN MULTIPOSITION RADIO-LOCATION COMPLEX

S.V. Kovbasyuk, V.I. Stephanovich

With the purpose of analytical decision of task of structural optimization of multiposition radio-location complex the method of multicriterion optimization is utilized after the nonlinear chart of compromises of professor Voronin F.M. the method of the optimum placing is Developed on locality of elements of multiposition radio-location complex on the base of the radio-location stations with an autonomous reception.

**Keywords:** co-ordinates of distribution, multiposition radio-location complex.