

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

И. С. Ашурков^а, адъюнкт

В. В. Какаев^б, канд. техн. наук, доцент

Н. А. Лешко^б, канд. техн. наук, доцент

^аВысшее военное училище ПВО, Ярославль, РФ

^бВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Введение: применение многопозиционных радиолокационных систем требует наилучшего, с точки зрения достижения заданных значений показателей качества, взаимного расположения их элементов. Для решения этой задачи необходимо оптимизировать пространственную структуру системы, предварительно определив и задав критерий оптимальности. **Цель:** поиск оптимального варианта размещения элементов многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета, который обладает наилучшим значением показателя качества из заданного конечного количества вариантов пространственной структуры. **Результаты:** методом полного перебора получен алгоритм оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной станции. Определено количество вариантов и получены результаты оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета и двумя приемными позициями. При этом определены точки местоположения приемных пунктов, обеспечивающие максимальное значение целевой функции — площади сечения рабочей зоны при заданных ограничениях и для различных высот полета целей. Эффективность использования алгоритма оценена значением коэффициента увеличения площади рабочей зоны.

Ключевые слова — многопозиционная радиолокационная система, некооперируемый источник подсвета, метод полного перебора.

Введение

Применение многопозиционных радиолокационных систем (МП РЛС) связано с необходимостью обеспечить взаимное месторасположение их элементов, позволяющее реализовать наилучшие потенциальные возможности по обнаружению и измерению координат целей. Область пространства, в пределах которой обеспечивается обнаружение объектов с вероятностью D не ниже заданной и измерение их координат с требуемой точностью σ_α , называют рабочей зоной [1]:

$$\Omega_{p,z} = \Omega_{z,o} \cap \Omega_{z,m}, \quad (1)$$

где $\Omega_{z,o} = \{X, Y, Z \mid D \geq D_{\text{тр}}\}$ — зона обнаружения; $\Omega_{z,m} = \{X, Y, Z \mid \sigma_\alpha \leq \sigma_{\text{доп}}\}$ — зона местоположения; $X \in \{X_{\text{min}}; X_{\text{max}}\}$, $Y \in \{Y_{\text{min}}; Y_{\text{max}}\}$, $Z \in \{Z_{\text{min}}; Z_{\text{max}}\}$ — области определения соответствующих декартовых прямоугольных координат, в совокупности задающие область анализа R^a , т. е. $\{X, Y, Z\} \in R^a$.

В системах с кооперируемыми источниками подсвета задача определения пространственной структуры, т. е. местоположения элементов, может быть решена на этапе ее синтеза. Особенностью применения систем с некооперируемыми источниками подсвета является априорная неопределенность местоположения и состояния передатчиков, которая преодолевается непосредственно в ходе применения системы. Поэтому

всякий раз при изменении точки или зоны расположения источника подсвета должен проводиться анализ рабочей зоны системы и последующий выбор пространственного размещения N приемных пунктов.

Под оптимизацией пространственной структуры МП РЛС будем понимать поиск p^* — дискретного варианта размещения элементов МП РЛС с некооперируемым источником подсвета, который обладает наилучшим значением показателя качества из заданного конечного количества вариантов $\mathbf{P} = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$, $\mathbf{P} \in R^a$. При этом под вариантом размещения $p_i, i = 1, \dots, M$, понимается совокупность векторов пространственных координат приемных пунктов системы $\mathbf{X}_\Pi = |x_{\Pi 1}, x_{\Pi 2}, \dots, x_{\Pi N}|$, $\mathbf{Y}_\Pi = |y_{\Pi 1}, y_{\Pi 2}, \dots, y_{\Pi N}|$, $\mathbf{Z}_\Pi = |z_{\Pi 1}, z_{\Pi 2}, \dots, z_{\Pi N}|$, а показателем качества выступает площадь сечения рабочей зоны $S_{\Omega_{p,z}}$ на высоте полета h_Π цели.

Целевая функция для решаемой задачи примет вид

$$S_{\Omega_{p,z}} = F(\mathbf{X}_\Pi, \mathbf{Y}_\Pi, \mathbf{Z}_\Pi). \quad (2)$$

В качестве критерия оптимизации будем использовать максимум площади рабочей зоны

$$S_{\Omega_{p,z}} = \max \quad (3)$$

при заданных ограничениях.

1. Расстояние между приемными пунктами должно быть не менее b_{min} и не более b_{max} (опре-

деляемое, например, дальностью прямой видимости) базового значения:

$$b_{\min} \leq b_{ij} \leq b_{\max};$$

$$b_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2},$$

$$i, j = 1, \dots, N, \quad (4)$$

где b_{ij} — базовое расстояние между приемными пунктами в МП РЛС; i, j — номера приемных пунктов.

2. Область расположения приемных пунктов $R^{п.п} \in R^a$ отделена от области, в которой задана траектория движения источника подсвета $R^{и.п} \in R^a$ поверхностью, проходящей через кривую на плоскости X, Y (например, линию границы или рубежа боевого соприкосновения), причем область анализа является объединением областей $R^a = R^{п.п} \cup R^{и.п}$.

3. Требуемая вероятность обнаружения и допустимая точность измерения координат объекта задаются, исходя из требований, предъявляемых к системе:

$$D_{\text{тр}} \in \{D_{\min}; D_{\max}\};$$

$$\sigma_{\text{доп}} \in \{0; \sigma_{\max}\}, \quad (5)$$

где $D_{\text{тр}}$ — требуемое значение вероятности правильного обнаружения объекта; $\sigma_{\text{доп}}$ — допустимое значение среднеквадратической ошибки определения местоположения объекта.

Для определения вида целевой функции воспользуемся криволинейным интегралом по замкнутому контуру, называемому циркуляцией [2, 3]:

$$S_{\Omega_{п.з}} = \frac{1}{2} \oint_{\Omega_{п.з} | h_{ц} = \text{const}} (xdy - ydx), \quad (6)$$

где $\Omega_{п.з} | h_{ц} = \text{const}$ — граница сечения рабочей зоны плоскостью $h_{ц}$, обходимая против часовой стрелки.

Порядок определения зон обнаружения и местоопределения $\Omega_{з.о}$ и $\Omega_{з.м}$, пересечением которых является рабочая зона (1), рассмотрен в работах [4–6].

Алгоритм оптимизации пространственной структуры МП РЛС

Для поиска глобального условного экстремума целевой функции воспользуемся методом полного перебора как наиболее простым для реализации и гарантирующим, что будет найден наилучший результат. При его использовании определяется значение целевой функции для всех возможных вариантов размещения приемных пунктов и выбирается наилучший в соответствии с заданным критерием.

Представим зону анализа в виде дискретного множества — трехмерной координатной матрицы ССС [7], содержащей $L = n \times m \times k$ элементов (n — по оси X , m — по оси Y , k — по оси Z) (рис. 1). Элементы матрицы являются узлами координатной сетки зоны анализа, а интервал Δ между ними при заданных линейных размерах зоны анализа определяет количество элементов, что влияет на точность решаемых задач.

Задаваясь значением высоты полета объекта $h_{ц} = z_i, i = \{1, 2, \dots, k\}$, для которой проводится анализ рабочей зоны, получим сечение трехмерной координатной матрицы, представляющее собой двумерную матрицу

$$CC = \begin{vmatrix} x_1y_1z_k & x_2y_1z_k & \dots & x_ny_1z_k \\ x_1y_2z_k & x_2y_2z_k & \dots & x_ny_2z_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1y_mz_k & x_2y_mz_k & \dots & x_ny_mz_k \end{vmatrix}, \quad (7)$$

элементы которой можно представить в виде вектора координат, записав их последовательно по столбцам:

$$C = |c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1m}, c_{21}, \dots, c_{2m}, \dots, c_{nm}| = |c_s|,$$

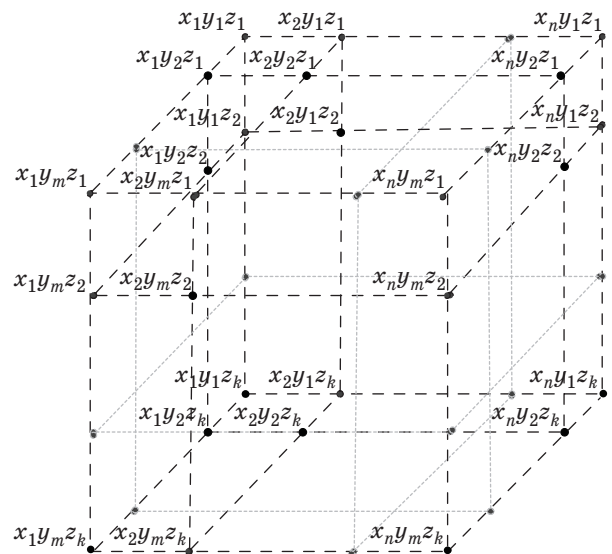
$$s = 1, 2, \dots, L. \quad (8)$$

Значения элементов вектора координат принадлежат области анализа

$$C \in R^a. \quad (9)$$

Поскольку приемные пункты инвариантны, то общее количество вариантов пространственной структуры МП РЛС можно представить как сочетание L элементов по N [3]:

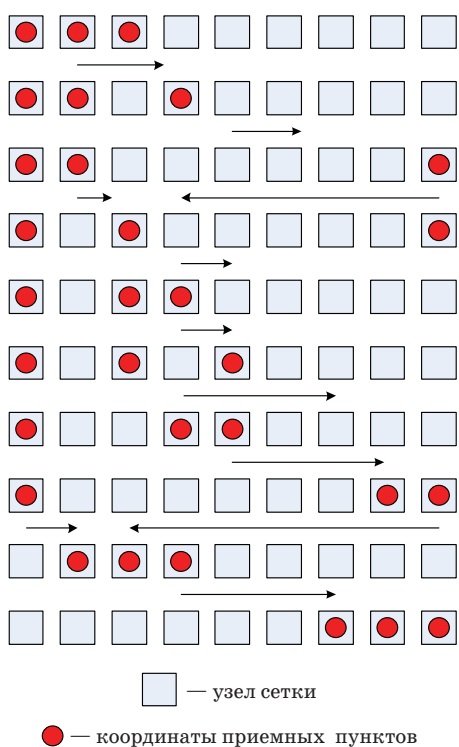
$$Q = \frac{L!}{N!(L-N)!}. \quad (10)$$



■ Рис. 1. Вид трехмерной координатной матрицы

Для оценки значения целевой функции в каждом из Q вариантов пространственной структуры МП РЛС разработан алгоритм, пример реализации десяти итераций которого при $N = 3, L = 9$ представлен на рис. 2.

После расчета всех значений целевой функции определяется результат, соответствующий ее максимальному значению $S_{\Omega_{p,3}, \max} = \max(S_{\Omega_{p,3-1}}, S_{\Omega_{p,3-2}}, \dots, S_{\Omega_{p,3-M}})$. Вариант пространственного размещения элементов МП РЛС при этом будет являться оптимальным p^* по заданному критерию (3), а размещение приемных позиций в точках с координатами, соответствующими этому варианту, позволит в полной мере



■ Рис. 2. Иллюстрация реализации алгоритма полного перебора

реализовать потенциальные пространственные и точностные возможности МП РЛС.

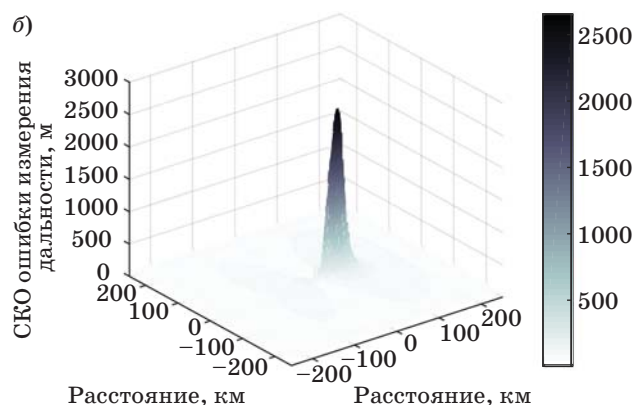
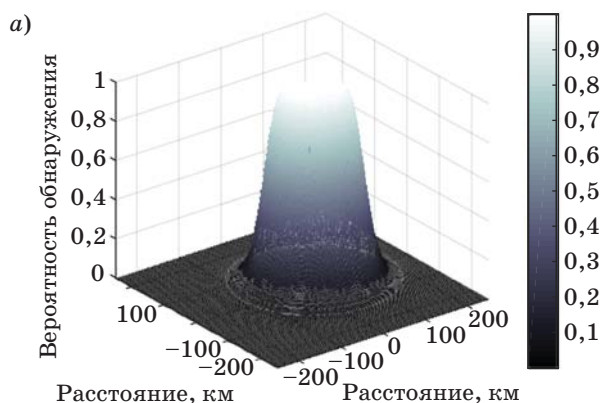
На рис. 3, а показана поверхность распределения вероятности правильного обнаружения, соответствующая зоне обнаружения, а на рис. 3, б — поверхность распределения потенциально достижимой точности измерения дальности, соответствующая зоне местоопределения для двух приемных пунктов, размещенных на местности произвольно.

Результаты оптимизации пространственной структуры МП РЛС из одной передающей и двух приемных позиций приведены в таблице. Область анализа составляет 500×500 км; дискретность сетки Δ составляет 10 км; порог по вероятности — 0,9; по точности — 1,5 км.

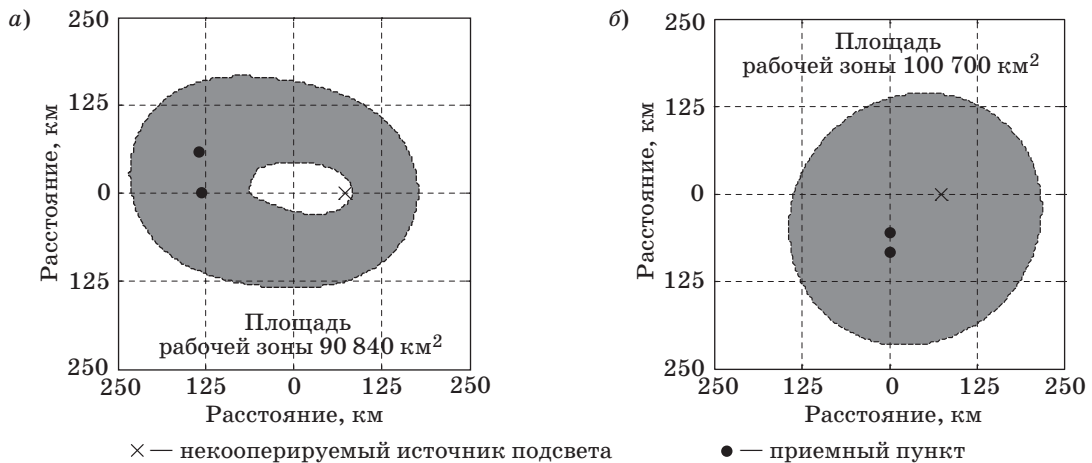
Анализ результатов свидетельствует о необходимости учета высоты обнаруживаемых объектов при определении точек местоположения элементов МП РЛС. Так, например, при обнаружении объектов на высоте 1000, 20 000, 50 000 м различны не только оптимальные значения целевой функции, но и точки расположения приемных пунктов (см. таблицу).

■ Результаты оптимизации пространственного местоположения методом полного перебора

Номер приемного пункта	Максимальное количество итераций	Оптимальные координаты приемных пунктов, м		Высота воздушного объекта, м	Площадь сечения, км ²
		X^*	Y^*		
1	25 200	0	-85 714	1000	100 700
2		0	-57 143		
1	25 200	-57 143	-28 571	20 000	99 140
2		-28 571	-28 571		
1	25 200	-57 143	0	50 000	94 640
2		-28 571	0		



■ Рис. 3. Поверхность вероятности правильного обнаружения (а) и точности местоопределения (б)



■ **Рис. 4.** Сечение рабочей зоны МП РЛС при неоптимизированном (а) и оптимизированном (б) размещении приемных позиций

Сечение рабочей зоны при произвольном (неоптимизированном) размещении приемных позиций и $h_{ц} = 1000$ м показано на рис. 4, а, результат решения оптимизационной задачи представлен на рис. 4, б.

Оценивая эффект оптимизации пространственной структуры коэффициентом увеличения площади рабочей зоны

$$K_{S_{\Omega_{p.з}}} = \frac{S_{\Omega_{p.з}}^*}{S_{\Omega_{p.з}}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $S_{\Omega_{p.з}}^*$ — оптимальное значение целевой функции, можно показать, что для рассмотренного примера его значение составляет 10,9 %.

Заключение

Таким образом, получен алгоритм, позволяющий методом перебора конечного количества вариантов пространственной структуры МП РЛС определить вариант, оптимальный по критерию максимума площади рабочей зоны. При размещении приемных позиций в точках, соответствующих оптимальному варианту, МП РЛС обладает наилучшими потенциальными возможностями по обнаружению целей и измерению их координат. Эффективность использования оптимизации можно оценивать значением коэффициента увеличения площади рабочей зоны. Необходимо учитывать, что время вычислений с использованием метода полного перебора возрастает по экспоненциальному закону в зависимости от размерности вектора \mathbf{P} . При невозможности использовать данный метод следует переходить к использованию других методов оптимизации, например методу ветвей и границ, генетическому методу.

Литература

1. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. Радиотехнические системы / под общ. ред. Ю. М. Казаринова. — М.: Высш. шк., 1990. — 496 с.
2. Батчев С. А., Вакуленко А. А. Оптимизация рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы при ограничениях по области размещения ее элементов // Научные технологии. 2008. № 6. С. 56–58.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1968. — 720 с.
4. Лешко Н. А., Ашурков И. С. Расчет рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы по стороннему источнику подсвета // Тр. МАИ. 2015. Вып. 83. www.mai.ru/science/trudy/ (дата обращения: 24.10.2015).
5. Ашурков И. С., Лешко Н. А., Цыбульник А. Н. Методика расчета рабочей зоны многопозиционной радиолокационной системы с посторонним источником подсвета // Вопросы оборонной техники. Сер. 16. Технические средства противодействия терроризму. 2015. Вып. 5–6. С. 87–91.
6. Ульянов Г. Н., Павлов И. Н. Локальная система позиционирования объектов вооружения, военной техники и личного состава // Изв. Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2008. № 1. С. 33–39.
7. Елисеев Д. В., Балдин А. В. Алгебра многомерных матриц для обработки адаптируемой модели данных // Наука и образование. 2011. <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html> (дата обращения: 20.09.2015).

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.81

Multiposition Radar System Space Structure OptimizationI. S. Ashurkov^a, Post-Graduate Student, ivan_ashurkov@mail.ruV. V. Kakaev^b, PhD, Tech., Associate Professor, kakaev_vv@mail.ruN. A. Leshko^b, PhD, Tech., Associate Professor, nikolai_zru@mail.ru^aHigher Military School of Air Defense, 28, Moskovskii Pr., 150001, Yaroslavl, Russian Federation^bA. F. Mozhaikii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Multiposition radar systems demand that their elements are arranged optimally from the viewpoint of the desired quality parameters. To solve this problem, the space structure of the system should be optimized, with the optimality criterion preliminarily defined. **Purpose:** This study searches for the optimal arrangement of elements in a multiposition radar system with an uncooperative illumination source, which would have the best quality parameter value among several options for the space structure. **Results:** Full enumeration method helped to obtain an algorithm of space structure optimization for a multiposition radar system. The number of variants was specified, and the space structure was optimized for a multiposition radar system with an uncooperative illumination source and two receiving stations. The location points of the receiving stations were specified, providing the maximum value of the target function which was the cross section of the working zone with preset limits for different heights of the target flight. The algorithm efficiency is assessed by the value of the working zone increase coefficient.

Keywords — Multiposition Radar System, Uncooperative Illumination Source, Full Enumeration Method.

References

1. Grischin Y. P., Ipatov V. P., Kazarinov Y. M. *Radiotekhnicheskie sistemy* [Radio Engineering Systems]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1990. 496 p. (In Russian).
2. Batchev S. A., Vakylenko A. A. Optimization of a Working Zone of the Multipositional Radar System with Limitations to the Location of its Elements. *Naukoemkie tekhnologii*, 2008, no. 6, pp. 56–58 (In Russian).
3. Korn G., Korn T. *Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 720 p. (In Russian).
4. Leshko N. A., Ashurkov I. S. Calculation of Working Zone of Multiposition Radar System by the Exterior Light Source. *Trudy MAI*, 2015, iss. 83. Available at: www.mai.ru/science/trudy/ (accessed 24 October 2015) (In Russian).
5. Ashurkov I. S., Leshko N. A., Cybulnik A. N. Design Procedure of the Working Zone of Multiposition Radar with an Extraneous Source Illumination. *Voprosy oboronnoi tekhniki. Ser. 16. Tekhnicheskie sredstva protivodeistviia terrorizmu*, 2015, vol. 5–6, pp. 87–91 (In Russian).
6. Ulyanov G. N., Pavlov I. N. Local Positioning System of Objects Weapons, Military Equipment and Personnel. *Izvestiia Rossiiskoi akademii raketnykh i artilleriiskikh nauk*, 2008, no. 1, pp. 33–39 (In Russian).
7. Eliseev D. V., Baldin A. V. Multidimensional Matrix Algebra to Handle Adaptable Data Model. *Nauka i obrazovanie*, 2011. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html> (accessed 20 September 2015) (In Russian).