

Использование метода прямого перебора для оптимизации пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы

Ашурков И.С.^{1*}, Лешко Н.А.^{2}, Какаев В.В.^{2***}**

¹*Ярославское высшее военное училище ПВО, Московский проспект, 28,
Ярославль, 150001, Россия*

²*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, ВКА имени А.Ф. Можайского,
Ждановская набережная, 13, Санкт-Петербург, 197082, Россия*

*e-mail: ivan_ashurkov@mail.ru

**e-mail: nikolai_zru@mail.ru,

***e-mail: kakaev_vv@mail.ru,

Аннотация

Предложен алгоритм, позволяющий методом полного перебора оптимизировать пространственную структуру многопозиционной РЛС при использовании в качестве целевой функции площади сечения рабочей зоны. Предложен критерий оптимальности, введены ограничения и получены результаты оптимизации в виде вариантов пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета и тремя приемными позициями. Эффективность использования алгоритма оценена значением коэффициента увеличения площади рабочей зоны.

Ключевые слова: многопозиционная радиолокационная система, некооперируемый источник подсвета, оптимизация пространственной структуры, метод прямого перебора.

Введение.

Одним из перспективных направлений совершенствования радиолокационных средств является создание многопозиционных радиолокационных систем (МП РЛС). Для эффективного применения МП РЛС необходимо обеспечивать взаимное месторасположение их элементов, позволяющее реализовать наилучшие потенциальные возможности по обнаружению целей и измерению их координат. 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]

$$\Omega_{pz} = \Omega_{zo} \cap \Omega_{zm}; \quad (1)$$

где $\Omega_{zo} = \{X, Y, Z \mid D \geq D_{тр}\}$ – зона обнаружения; $\Omega_{zm} = \{X, Y, Z \mid \sigma_\alpha \leq \sigma_{доп}\}$ – зона местоопределения; $X \in \{X_{min}; X_{max}\}$, $Y \in \{Y_{min}; Y_{max}\}$, $Z \in \{Z_{min}; Z_{max}\}$ – области определения соответствующих декартовых прямоугольных координат в совокупности, задающие область анализа R^a , то есть $\{X, Y, Z\} \in R^a$.

В системах с кооперируемыми источниками подсвета задача определения пространственной структуры, то есть местоположения элементов может быть решена на этапе её 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.

Постановка задачи. Целью работы является разработка алгоритма решения оптимизационной задачи определения пространственной структуры многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета с учетом ограничений на взаимное расположение элементов МП РЛС, а также на качество радиолокационной информации.

Описание алгоритма. Под оптимизацией пространственной структуры МП РЛС будем понимать поиск p^* – дискретного варианта размещения элементов многопозиционной радиолокационной системы с некооперируемым источником подсвета, который обладает наилучшим значением показателя качества из заданного конечного количества вариантов $P = \{p_1, p_2, \dots, p_M\}$, $P \in R^a$. При этом под вариантом размещения p_i , $i = \overline{1, \dots, M}$, понимается совокупность векторов пространственных координат приемных пунктов системы $X_{\Pi} = |x_{\Pi 1}, x_{\Pi 2}, \dots, x_{\Pi N}|$, $Y_{\Pi} = |y_{\Pi 1}, y_{\Pi 2}, \dots, y_{\Pi N}|$, $Z_{\Pi} = |z_{\Pi 1}, z_{\Pi 2}, \dots, z_{\Pi N}|$, а показателем качества выступает площадь сечения рабочей зоны $S_{\Omega_{\text{рз}}}$ на высоте полета $h_{\text{ц}}$ цели.

Целевая функция для решаемой задачи примет вид

$$S_{\Omega_{\text{рз}}} = F(X_{\text{П}}, Y_{\text{П}}, Z_{\text{П}}). \quad (2)$$

В качестве критерия оптимизации будем использовать максимум площади сечения рабочей зоны

$$S_{\Omega_{\text{рз}}} = \max. \quad (3)$$

Введем ограничения:

1. Расстояние между приемными пунктами должно быть не менее b_{\min} и не более b_{\max} (определяемого, например, дальностью прямой видимости) базового значения:

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

$$b_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2}, \quad i, j = \overline{1, \dots, N}; \quad (4)$$

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

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

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

$$\begin{aligned} D_{\text{тр}} &\in \{D_{\text{min}}; D_{\text{max}}\}; \\ \sigma_{\text{доп}} &\in \{0; \sigma_{\text{max}}\}; \end{aligned} \quad (5)$$

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 циркуляцией – криволинейным интегралом по замкнутому контуру [2, 3]

$$S_{\Omega_{\text{рз}}} = \frac{1}{2} \oint_{\Omega_{\text{рз}} | h_{\text{ц}} = \text{const}} (x dy - y dx); \quad (6)$$

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

Порядок определения зон обнаружения и местоопределения $\Omega_{\text{зо}}$ и $\Omega_{\text{зм}}$, пересечением которых является рабочая зона (1), рассмотрен в работах [4, 5, 6, 7, 8].

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 в соответствии с заданным критерием выбирается наилучший из них.

Представим зону анализа в виде дискретного множества – трехмерной координатной матрицы [9], изображенной на рисунке 1, которая содержит $L = n \times m \times k$

элементов (n – по оси X , m – по оси Y , k – по оси Z). Элементы матрицы являются узлами координатной сетки зоны анализа, а интервал между ними Δ при заданных линейных размерах зоны анализа определяет количество элементов, что влияет на точность решаемых задач.

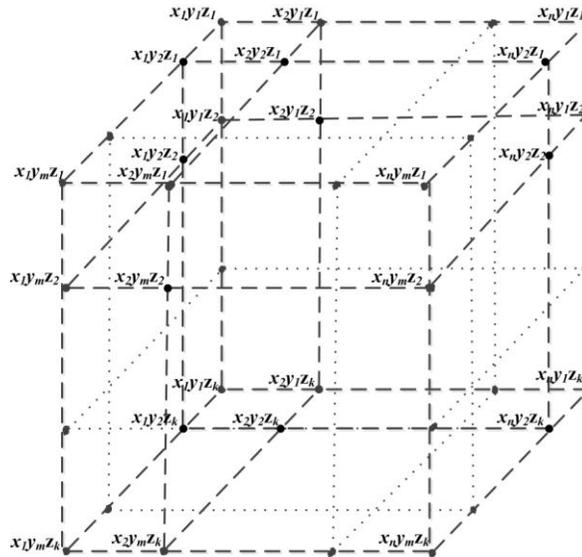


Рис.1. Вид трехмерной координатной матрицы

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

$$CC = \begin{pmatrix} x_1 y_1 z_k & x_2 y_1 z_k & \dots & x_n y_1 z_k \\ x_1 y_2 z_k & x_2 y_2 z_k & \dots & x_n y_2 z_k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1 y_m z_k & x_2 y_m z_k & \dots & x_n y_m z_k \end{pmatrix}, \quad (7)$$

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

$$C = |c_{11}, c_{12}, \dots, c_{1m}, c_{21}, \dots, c_{2m}, \dots, c_{lm}| = |c_s|, \quad s = 1, 2, \dots, L. \quad (8)$$

Значения элементов вектора координат принадлежат области анализа

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

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

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

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

Ограничением на использование метода полного перебора может являться время вычислений, которое возрастает по экспоненциальному закону с увеличением размерности вектора P . В этом случае всегда имеется возможность использования других методов оптимизации, например, метода ветвей и границ, генетического и других. Однако, следует отметить, что полный перебор обеспечивает наивысшую точность, при соответствующем выборе значения Δ .

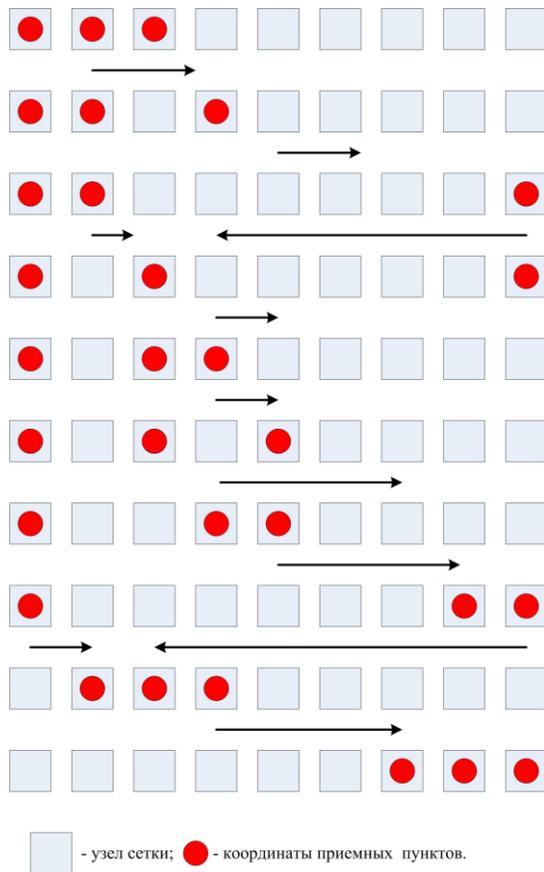


Рис. 2. Иллюстрация реализации алгоритма полного перебора

После расчета всех значений целевой функции определяется результат соответствующий её максимальному значению $S_{\Omega_{pz_max}} = \max(S_{\Omega_{pz_1}}, S_{\Omega_{pz_2}}, \dots, S_{\Omega_{pz_M}})$.

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 реализовать потенциальные пространственные и точностные возможности МП РЛС.

На рисунке 3 показано распределение вероятности правильного обнаружения, позволяющее оценить зону обнаружения, а на рисунке 4 –распределения потенциально

достижимой точности измерения дальности, что позволяет оценить зону местоопределения для трех приемных пунктов, размещенных на местности произвольно.

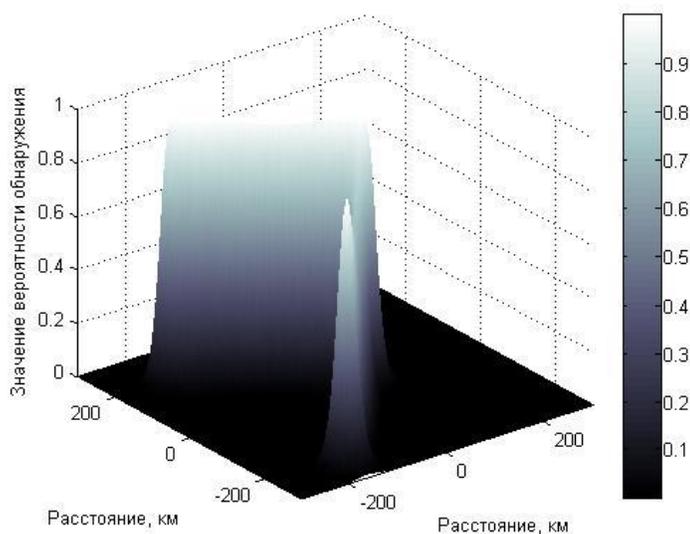


Рис. 3. Вид поверхности распределения вероятности правильного обнаружения

В таблице 1 приведены результаты оптимизации пространственной структуры МП РЛС в составе одной передающей и трех приемных позиций. Размеры области анализа составляют 600x600 км; высота источника подсвета 9000 м; интервал между элементами координатной матрицы $\Delta = 3$ км; порог по вероятности $D_{тр} = 0.9$; по точности $\sigma_{доп} = 2.5$ км.

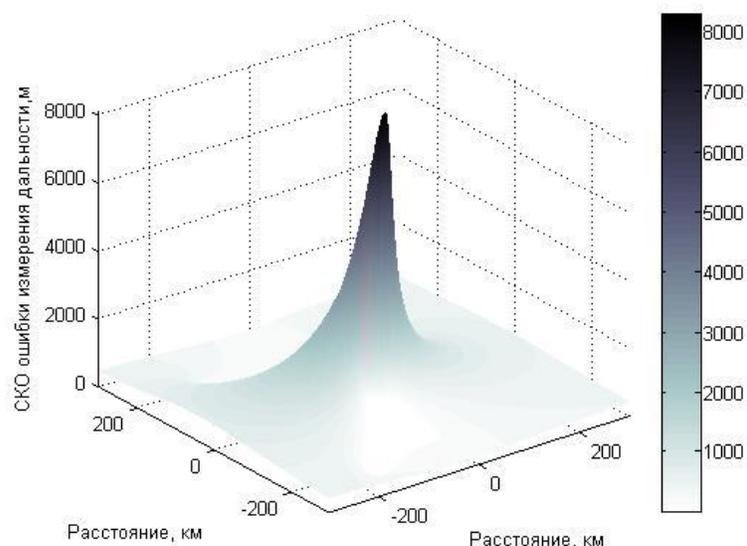


Рис. 4. Вид поверхности распределения точности местоопределения

Анализ результатов свидетельствует о необходимости учета высоты обнаруживаемых объектов при определении точек местоположения элементов МП РЛС. Так, например, при обнаружении объектов на высоте 1000 м, 20000 м, 50000 м различны не только оптимальные значения целевой функции, но и точки расположения приемных пунктов (таблица 1).

Результаты оптимизации пространственного местоположения методом полного перебора

Таблица 1

Номер приемного пункта	Максимальное количество итераций	Оптимальные координаты приемных пунктов, м		$h_{ц}, м$	$S_{\Omega_{рз}}, км^2$
		X^*	Y^*		
1	487344	-98181	-32727	1000	170800
2		-76364	-10909		
3		-54546	10909		
1	487344	-76364	-32727	20000	169400
2		-54546	-10909		
3		-32727	10909		

Номер приемного пункта	Максимальное количество итераций	Оптимальные координаты приемных пунктов, м		$h_{ц}$, м	$S_{\Omega_{pz}}$, км ²
		X^*	Y^*		
1	487344	-108333	-86667	50000	163100
2		-86667	-65000		
3		-65000	-65000		

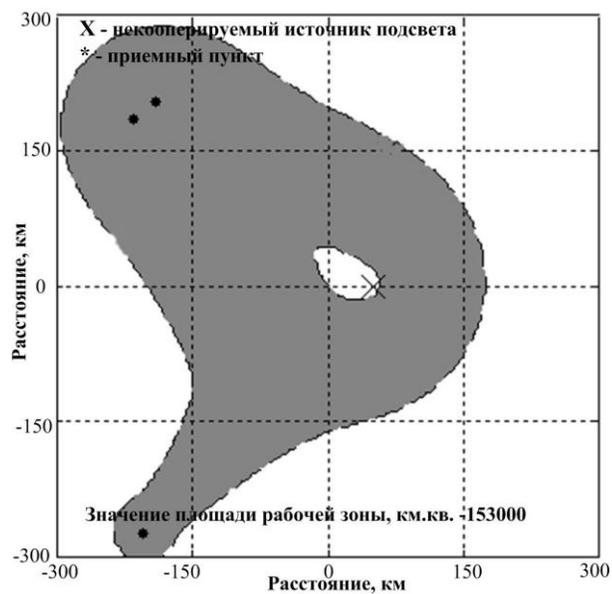
На рисунке 5 а показано сечение рабочей зоны при произвольном (неоптимизированном) размещении приемных позиций и $h_{ц}=1000$ м. Результат решения оптимизационной задачи показан на рисунке 5 б, где положение источника подсвета показано крестом, а приемных позиций точками.

Оценить эффект оптимизации пространственной структуры можно коэффициентом увеличения площади рабочей зоны

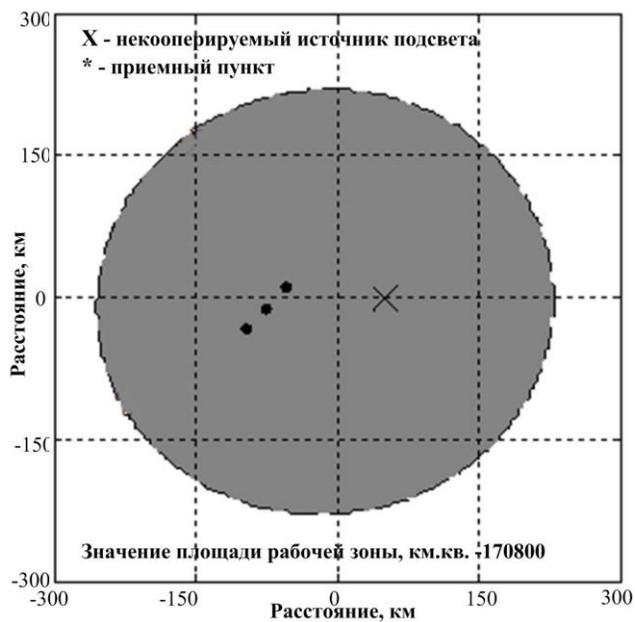
$$K_{S_{\Omega_{pz}}} = \frac{S_{\Omega_{pz}}^*}{S_{\Omega_{pz}}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где $S_{\Omega_{pz}}^*$ – оптимальное значение целевой функции.

Использование полного перебора вариантов пространственной структуры МП РЛС позволяет определить, как максимальное, так и минимальное значение целевой функции $S_{\Omega_{pz_min}}$. Подставив это значение в знаменатель выражения (11) получим максимальное значение коэффициента увеличения площади рабочей зоны. Можно показать, что для рассматриваемых примеров его значение составляет 11,6% для $h_{ц}=1000$ м; 14,7% и 27,2% для $h_{ц}= 20000$ м и 50000 м, соответственно.



а)



б)

Рис. 5. Сечение рабочей зоны МП РЛС при неоптимизированном размещении приемных позиций – а); оптимизированном размещении – б)

Выводы. Таким образом, целесообразно располагать приемные позиции в точках, соответствующих оптимальному варианту пространственной структуры МП РЛС. Тем самым создаются условия для получения максимальных значений показателей возможностей многопозиционной системы по обнаружению и измерению координат воздушных объектов. Задавая должным образом требования к пространственному размещению элементов МП РЛС, можно получить требуемую форму рабочей зоны.

Библиографический список

1. Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М. Радиотехнические системы. - М: Высшая школа, 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. 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 // Труды МАИ, 2015, № 83: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62297>
5. Ашурков И.С., Лешко Н.А., Цыбульник А.Н. Методика расчета рабочей зоны

многопозиционной радиолокационной системы с посторонним источником подсвета // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2015. № 5-6. С.87 – 91.

6. Ульянов Г.Н., Павлов И.Н. Локальная система позиционирования объектов вооружения, военной техники и личного состава // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2008. № 1. С. 33-39.

7. Кирсанов А.П., Ямпольский С.М. Прямолинейные траектории скрытного движения воздушного объекта в зоне обнаружения бортовой доплеровской радиолокационной станции // Труды МАИ, 2015, № 84,; <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=63124>

8. Сычев М.И., Фесенко С.В. Оценивание координат и параметров движения воздушных судов по информации от радиолокационных средств наблюдения // Труды МАИ, 2015. № 83: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=62280>

9. Елисеев Д.В., Балдин А.В. Алгебра многомерных матриц для обработки адаптируемой модели данных // Наука и образование, 2011. URL: Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/199561.html>.