

**Хабиров Д.О., Славянский А.О., Радченко А.А.**  
 ОАО «Научный центр прикладной электродинамики»

## Пример оптимизации расположения антенных элементов плоской антенной решетки фазового пеленгатора

*Рассматривается решение задачи оптимизации плоской антенной решетки фазового пеленгатора кругового обзора. Особенностью антенной решетки является неравномерное расположение антенных элементов вдоль сторон прямоугольника. Приводится описание метода оптимизации, основанного на использовании взаимно простых чисел. Результатом проведения оптимизации стало снижение вероятности возникновения аномально больших ошибок пеленгации*

**Ключевые слова:** фазовый радиопеленгатор, антенный элемент, фазометрическая шкала.

В городах и промышленных центрах России в последнее время возросло число нелегальных источников радиоизлучения (ИРИ) с различными уровнями мощности и большим (по уровню и спектру) числом паразитных излучений, не соответствующих допустимым нормам и международным стандартам. Это требует выработки технических мер по оценке количества ИРИ, определения характеристик их излучения и нахождения территориального размещения ИРИ [1].

Так, одним из способов оперативного обнаружения ИРИ диапазона GSM-900 может быть применение фазового радиопеленгатора. Зачастую условия реального применения фазовых радиопеленгаторов не позволяют работать с антенной системой в виде кольцевой антенной решетки, что является оптимальным вариантом конфигурации антенной системы для кругового обзора пространства [2].

В данной работе рассматривается вариант конфигурации антенной системы, в котором антенные элементы размещены неравномерно вдоль длинных сторон плоского прямоугольника  $1 \times 1,3$  метра (с возможностью сдвига внутрь прямоугольника не более чем на 50 мм, а также с возможностью размещения одной из антенн в области центра прямоугольника). На рисунке 1 показана исходная конфигурация рассматриваемой антенной системы в прямоугольной системе координат: ось  $X$  направлена вдоль длинной стороны прямоугольника  $1 \times 1,3$  метра, ось  $Y$  – перпендикулярно ей.

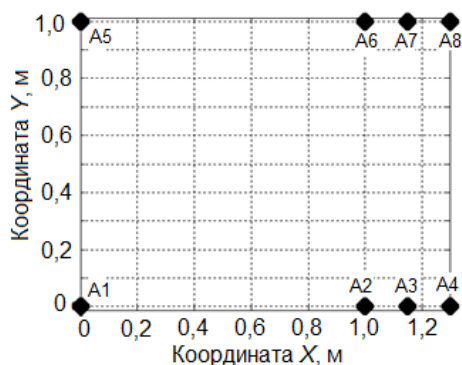


Рисунок 1 – Конфигурация антенной системы фазового пеленгатора;  
 A1 ... A8 – антенные элементы с порядковыми номерами

Оптимизация рассматриваемой антенной системы, т.е. определение точных мест размещения антенных элементов, может быть проведена с помощью базовых принципов фазовой пеленгации.

В фазовых радиопеленгаторах реализуется метод пеленгования, основанный на измерении величины разности фаз сигналов, принятых на разнесенные в пространстве антенны. Данный метод не налагает каких-либо ограничений на диаграммы направленности применяемых антенн [2], поэтому в рассматриваемом случае могут быть применены четвертьволновые вибраторы с общей экранирующей плоскостью.

Простейший фазовый пеленгатор содержит две одинаковые антенны, разнесенные в пространстве на известное расстояние  $L$ , называемое фазометрической шкалой, а также устройства для усиления принятых сигналов и измерения разности фаз между ними.

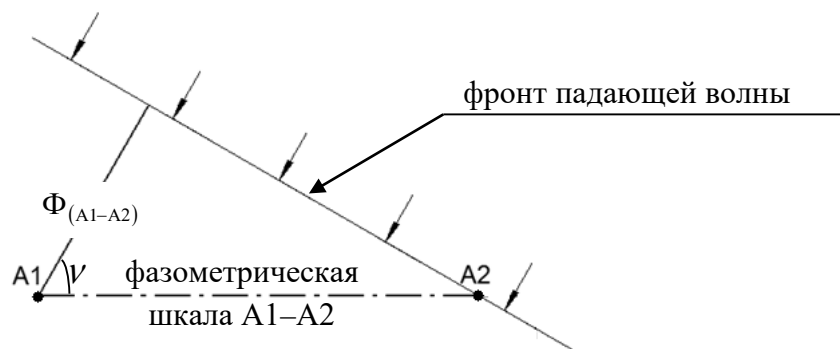


Рисунок 2 – Схема простейшего фазового пеленгатора

Если расстояние от источника излучения до пеленгатора значительно превышает длину фазометрической шкалы  $A1-A2$  (рисунок 2), то фронт падающей волны можно считать плоским. Задержка сигнала, поступающего в антенну  $A1$ , относительно сигнала, поступающего в антенну  $A2$ , выражается формулой [2]:

$$\tau_3 = \frac{L \cos \nu}{c},$$

где  $\tau_3$  – задержка сигнала,  $c$  – скорость распространения радиоволн,  $\nu$  – угол прихода волны, отсчитанный от оси, на которой расположены фазовые центры антенн  $A1, A2$ .

Фазовый сдвиг сигналов, соответствующий задержке  $\tau_3$ , определяется выражением:

$$\Phi = \frac{2\pi \cdot L}{\lambda} \cos \nu.$$

Таким образом, косинус угла прихода волны (направляющий косинус) равен

$$\cos \nu = \frac{\Phi \cdot \lambda}{2\pi \cdot L}.$$

Для достижения высокой точности пеленгования длина фазометрической шкалы должна значительно превышать длину волны [2]. При этом измеренное значение  $\Phi$  фазового сдвига сигналов может многократно превосходить интервал ее однозначного определения, равный  $2\pi$ . Для устранения неоднозначности привлекают измерения фаз других аналогичных сигналов [3]. Получается система фазометрических шкал с различными периодами следования отсчетов шкал, которая при совместной обработке позволяет установить однозначную оценку параметра (направляющего косинуса).

В рассматриваемой антенной системе совместная обработка измеренных разностей фаз проводится с помощью метода суммирования косинусоид [3]. При этом в качестве

опорного используется антенный элемент A1 (см. рисунок 1). Таким образом, при вычислении пеленга (угла  $\nu$ , отсчитанного от оси X) учитываются 7 измеренных значений фазовых сдвигов  $\Phi_{(A2-A1)} \dots \Phi_{(A8-A1)}$  между токами в опорной антенне и во всех остальных антеннах. Для вычисления пеленга формируется функция угла  $\nu$ , представляющая собой сумму косинусоид. Начальные фазы косинусоид равны значениям  $\Phi_{(A2-A1)} \dots \Phi_{(A8-A1)}$ . Угол  $\nu$  вычисляется как аргумент данной функции, в точке, где функция принимает наибольшее значение:

$$\nu = \arg \max_{\nu} \left[ \sum_{i=2}^8 \cos(2 \cdot \pi \cdot n_{(Ai-A1)} \cdot \cos(\nu - \alpha_{i-1}) - \Phi_{(Ai-A1)}) \right]$$

Здесь  $n_{(A2-A1)} \dots n_{(A8-A1)}$  – масштабные коэффициенты фазометрических шкал, образованных антенными элементами A2–A1 ... A8–A1 соответственно (при этом  $n = \frac{L}{\lambda}$ , где L – длина фазометрической шкалы);

$\alpha_{(A2-A1)} \dots \alpha_{(A8-A1)}$  – величины углов между осью X и направлениями фазометрических шкал, образованных антенными элементами A2–A1 ... A8–A1 соответственно.

На рисунке 3 представлены нормированные графики зависимостей сумм косинусоид от угла  $\nu$ , для 3-х заданных значений угла падения волны на антенную систему: 30°, 180° и 300°. Графики получены путем математического моделирования.

Из представленных графиков видно, во всех случаях сумма косинусоид принимает максимальное значение в точках, соответствующих заданным значениям угла падения волны на антенную систему.

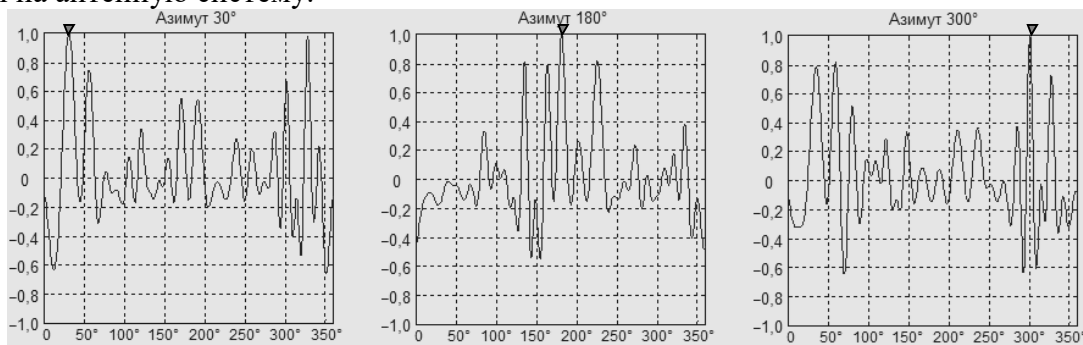


Рисунок 3 – Графики значений сумм косинусоид

Также из представленных графиков видно, что графики суммы косинусоид содержат не только основные максимумы, соответствующие истинным значениям заданного угла падения волны, но и побочные, возникшие вследствие неоднозначности фазовых измерений. Величина побочных максимумов может достигать величины основного максимума, что может привести к возникновению anomalously больших ошибок в процессе пеленгации.

Снизить вероятность возникновения таких ошибок можно, применив следующий способ размещения антенных элементов антенной системы фазового пеленгатора [2].

Координаты антенных элементов должны быть подобраны таким образом, чтобы вектор  $\vec{n}_A = [n_{(A2-A1)} \dots n_{(A8-A1)}]$  масштабных коэффициентов фазометрических шкал был коллинеарен вектору  $\vec{e}$  взаимно простых чисел:

$$\vec{e} = \Delta \nu \cdot \vec{n}_A.$$

Коэффициент  $\Delta \nu$  представляет собой интервал однозначности функции правдоподобия многошкальной системы [2].

Для оптимизации рассматриваемой антенной системы фазового пеленгатора необходимо выбрать величину  $\Delta\nu$  и подобрать вектор  $\vec{e}$  взаимно простых чисел. При этом места размещения антенных элементов, указанные на рисунке 1, могут быть сдвинуты внутрь прямоугольника не более чем, на 50 мм, и один из антенных элементов может быть перемещен в область центра прямоугольника.

Моделирование различных вариантов конфигурации рассматриваемой антенной системы показало, что величина  $\Delta\nu$  может быть выбрана равной 66. При длине волны, равной 333 мм, вектор  $\vec{e}$  взаимно простых чисел должен удовлетворять условию:

$$\vec{e} = \frac{66 \cdot \vec{L}}{333},$$

где  $\vec{L}$  – вектор длин фазометрических шкал.

Таким образом,  $\vec{L} = 5 \cdot \vec{e}$ .

Перейдя от векторов  $\vec{e}$  и  $\vec{L}$  к их проекциям на оси координат, получим:

$$\vec{L}_x = 5 \cdot \vec{e}_x, \quad \vec{L}_y = 5 \cdot \vec{e}_y.$$

Для рассматриваемой антенной системы найдены следующие векторы  $\vec{e}_x$  и  $\vec{e}_y$ :

$$\vec{e}_x = \begin{bmatrix} 199 \\ 223 \\ 257 \\ 3 \\ 211 \\ 227 \\ 263 \end{bmatrix}, \quad \vec{e}_y = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 199 \\ 113 \\ 193 \\ 191 \end{bmatrix}.$$

Опорный антенный элемент (A1) расположен в начале координат. Тогда с учетом коэффициента пропорциональности между векторами  $\vec{L}$  и  $\vec{e}$ , координаты  $[x_i, y_i]$  антенных элементов:

$$[x_i, y_i] = \begin{bmatrix} 0; & 0 \\ 995; & 0 \\ 1115; & 0 \\ 1285; & 0 \\ 15; & 995 \\ 1055; & 565 \\ 1135; & 965 \\ 1315; & 955 \end{bmatrix}.$$

Таким образом, один из антенных элементов расположен в области центра прямоугольника. Моделирование показало, что это является необходимым условием оптимизации рассматриваемой антенной системы с точки зрения вероятности возникновения аномально больших ошибок.

Конфигурация антенной системы, соответствующая найденным координатам антенных элементов, представлена на рисунке 4.

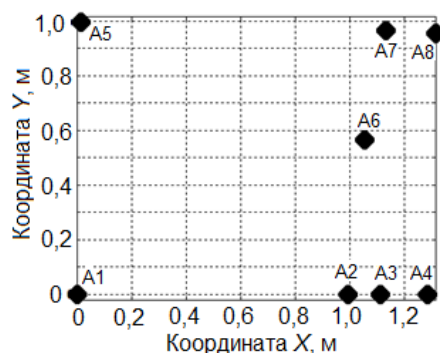


Рисунок 4 – Конфигурация антенной системы фазового пеленгатора

На рисунке 5 представлены нормированные графики зависимостей сумм косинусоид от угла  $\nu$ , для 3-х заданных значений угла падения волны на антенную систему:  $30^\circ$ ,  $180^\circ$  и  $300^\circ$ . Графики также получены путем математического моделирования.

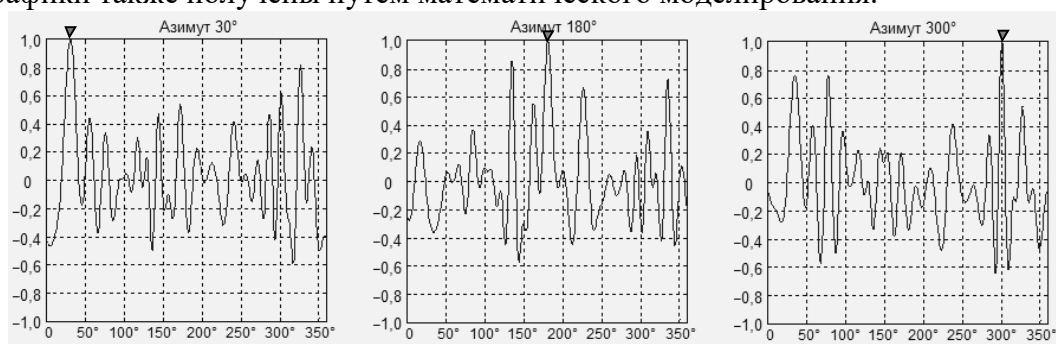


Рисунок 5 – Графики значений сумм косинусоид

Из представленных графиков видно, что проведенная оптимизация рассматриваемой системы величины побочных максимумов в целом снизились. Таким образом, вероятность возникновения anomalously больших ошибок в процессе пеленгации также стала меньше.

Следует отметить, что описанный способ оптимизации антенных систем фазовых пеленгаторов может быть применен к антенным системам любой формы и конфигурации.

#### Библиографический список

1. Рембовский А.М., Ашихмин А.В., Козьмин В.А. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / Под ред. А.М. Рембовского. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия–Телеком. – 2010. – 624 с.
2. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы: Монография. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – 2002. – 251 с.
3. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем: Монография. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – 2007. – 148 с.
4. В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, М.В. Крутиков, А.А. Мещеряков. Исследование работы фазового пеленгатора с квазиоптимальным устранением неоднозначности на наземных трассах. – Доклады ТУСУРа. – №2 (24), часть 1. – декабрь 2011 г. – С. 7-15