

Исследование пеленгационного рельефа, формируемого линейной антенной решеткой при обработке сигналов по методу Кейпона

Б.П. Борисов¹, Д.Д. Габриэлян², А.В. Лысенко², Л.П. Радио¹

¹ Южный федеральный университет
344006, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону
ул. Большая Садовая, 105/42

² ФНИЦ «ФГУП «РНИИРС»
344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону
ул. Нансена, 130

В статье рассматриваются потенциальные характеристики пеленгационного рельефа, формируемого линейной антенной решеткой при использовании алгоритма Кейпона. Получены аналитические соотношения, устанавливающие взаимосвязь между параметрами антенны (число и шаг размещения излучателей) и пеленгационного рельефа (шириной по уровню половинной мощности и уровнем бокового излучения).

Ключевые слова: антенная решетка, сверхразрешение, корреляционная матрица.

Введение

В связи с широким распространением радиоэлектронных средств различного назначения и соответствующим усложнением радиоэлектронной обстановки приобретают особую актуальность вопросы применения методов сверхразрешения для пространственной обработки сигналов в антенных системах. Данное обстоятельство определяется тем, что использование указанных методов позволяет получить для источников сигналов угловое разрешение более высокой степени, чем определяемое размерами апертуры антенны в соответствии с критерием Рэля [1–3].

Графическое представление характерного пеленгационного рельефа (ПР) линейной антенной решетки изотропных излучателей при использовании метода Кейпона приведено на рис. 1 (кривая 1). Для сравнения кривой 2 на этом рисунке показан ПР, формируемый данной антенной при использовании классического метода пространственной обработки сигналов.

Приведенные зависимости иллюстрируют значительные возможности по повышению разрешающей способности антенных систем при использовании методов сверхразрешения. Обзор указанных алгоритмов приведен в работах [1–6], где достаточно подробно исследованы

характеристики антенн, достигаемые при применении алгоритмов сверхразрешения. В работе [5], в частности, рассмотрены зависимости разрешающей способности в антенных решетках (АР) от мощности сигналов и числа излучателей. В данной статье проводится анализ взаимосвязи потенциально достижимых параметров ПР при пеленговании одного источника сигнала с параметрами антенны (число излучателей) и принимаемого сигнала (мощности и направления прихода).

1. Математическая модель линейной адаптивной антенной решетки с пространственной обработкой сигнала по методу Кейпона

Рассмотрим линейную АР, состоящую из N изотропных излучателей, расположенных на расстоянии d друг от друга. Пеленгационный рельеф, формируемый антенной при использовании метода Кейпона, описывается соотношением [7]

$$P(\varphi) = \left[\mathbf{v}(\varphi)^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{v}(\varphi)^* \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\mathbf{v}(\varphi)$ – сканирующий вектор АР; \mathbf{R} – корреляционная матрица сигналов; « T », « $*$ » – соответственно обозначения операций транспонирования и комплексного сопряжения.

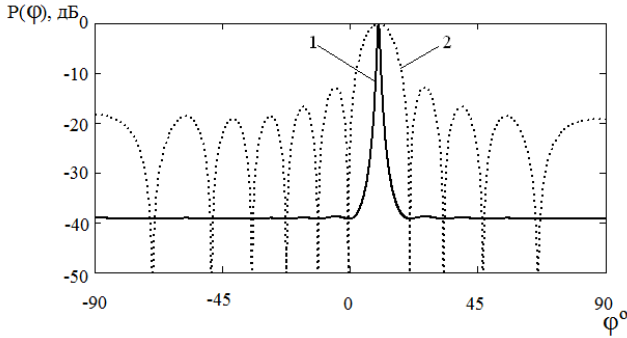


Рис. 1. Пеленгационный рельеф 9-элементной линейной АР (кривая 1 – при использовании метода Кейпона, кривая 2 – классический метод пространственной обработки)

Корреляционная матрица может быть записана следующим образом

$$\mathbf{R} = \sigma^2 \mathbf{E} + U^2 \mathbf{s}(\varphi_1) \mathbf{s}(\varphi_1)^T, \quad (2)$$

где σ^2 – мощность теплового шума в канале АР; U^2 – мощность пеленгуемого сигнала; \mathbf{E} – единичная матрица размерности N ; φ_1 – направление прихода пеленгуемого сигнала, отсчитываемое от нормали к линии расположения излучателей.

Для линейной АР элементы векторов определяются соотношениями:

$$v_n(\varphi) = \exp(-ikx_n \sin \varphi),$$

$$s_n(\varphi_1) = \exp(-ikx_n \sin \varphi_1),$$

в которых k – волновое число; x_n – координата n -го излучателя ($n = 1, \dots, N$).

2. Результаты исследований

Представим обратную корреляционную матрицу в виде [8]

$$\mathbf{R}^{-1} = \sigma^{-2} \left(\mathbf{E} - \frac{U^2/\sigma^2}{1 + NU^2/\sigma^2} \overline{\mathbf{s}(\varphi_1) \mathbf{s}(\varphi_1)^T} \right). \quad (3)$$

Подстановка соотношения (3) в выражение (1) позволяет дать следующее представление для ПР:

$$P(\varphi) = \left[N - \frac{F^2(\varphi)U^2/\sigma^2}{1 + NU^2/\sigma^2} \right]^{-1}, \quad (4)$$

где $F^2(\varphi)$ – ДН линейной АР по мощности.

При фазировании АР на источник пеленгуемого сигнала, что соответствует выбору сканирующего вектора $\mathbf{v} = \mathbf{s}(\varphi_1)^*$, $F^2(\varphi) = N^2$ и уровень ПР с учетом соотношений (1) и (4) определяются следующим выражением:

$$P(\varphi_1) = \left[N - \frac{N^2 U^2 / \sigma^2}{1 + NU^2 / \sigma^2} \right]^{-1}, \quad (5)$$

которое при условии $NU^2/\sigma^2 \gg 1$ после простых преобразований приводится к виду

$$P(\varphi_1) = U^2 / \sigma^2. \quad (6)$$

При фазировании АР в произвольном направлении вне главного максимума ПР из формулы (4) получаем

$$P(\varphi) = N^{-1}. \quad (7)$$

Данная формула получается непосредственно из (4) с учетом того, что $F^2(\varphi) \ll N^2$. Таким образом, уровень ПР вне главного максимума, формируемый при использовании метода Кейпона, является постоянным. Максимальное значение ПР превосходит данный уровень в NU^2/σ^2 раз. При использовании классического метода формирования ПР отношение максимального значения к уровню боковых лепестков не зависит ни от числа излучателей, ни от мощности принимаемого сигнала.

Проведем оценку ширины главного максимума ПР, формируемого при использовании метода Кейпона. С учетом выражений (1) и (3) угловая зависимость ПР может быть представлена в виде

$$P(\varphi) = \left[N - \frac{F_1^2(\varphi)U^2/\sigma^2}{1 + NU^2/\sigma^2} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $F_1^2(\varphi)$ – квадрат амплитудной диаграммы направленности (ДН) в направлении φ линейной АР, сфазированной в направлении φ_1 .

Для линейной АР изотропных излучателей имеем

$$F_1^2(\varphi) = \frac{\sin^2(kdN \sin \psi/2)}{\sin^2(kd \sin \psi/2)}, \quad (9)$$

где $\psi = \varphi - \varphi_1$.

В области главного максимума (при малых значениях ψ и условии $kdN\psi/2 \leq 1$) $F_1^2(\varphi)$ может быть представлена зависимостью

$$F_1^2(\varphi) \approx N^2 - k^2 d^2 N^4 \psi^2 / 12.$$

С учетом последнего соотношения угловая зависимость ПР в области главного максимума может быть определена с помощью соотношения

$$P(\varphi) = U^2 / \sigma^2 \left[1 + k^2 d^2 N^3 \psi^2 U^2 / 12 \sigma^2 \right]^{-1}. \quad (10)$$

Последнее соотношение позволяет легко определить ширину главного максимума ПР по уровню половинной мощности:

$$\Delta\psi_{0,5} = \frac{2\sqrt{3}}{kd\sqrt{N^3 U^2 / \sigma^2}}. \quad (11)$$

Таким образом, приведенные в статье соотношения позволяют для случая пеленгования одного источника установить закономерности,

связывающие параметры линейной АР с параметрами ПР.

Заключение

Использование метода Кейпона при формировании ПР линейной АР позволяет добиться сужения главного лепестка ПР по сравнению с классическим методом и обеспечить более высокий уровень отношения значений ПР в направлении главного максимума и вне главного лепестка. При этом уровень ПР вне главного максимума является практически постоянным. На основе аналитических преобразований обратной матрицы получены следующие закономерности:

- уровень максимального значения ПР в направлении на источник сигнала превосходит уровень ПР в других направлениях в NU^2/σ^2 раз, в то время как при использовании классического метода формирования ПР соотношение между максимальным значением ПР и средним уровнем ПР не зависит ни от числа излучателей, ни от мощности пеленгуемого сигнала;

- ширина главного максимума ПР при использовании метода Кейпона обратно пропорциональна относительной мощности пеленгуемого сигнала, в то время как для классического метода не зависит от этого параметра;

- при увеличении числа излучателей линейной АР ширина главного максимума ПР уменьшается по закону $N^{-3/2}$ (при использовании классического метода – по закону N^{-1}).

Список литературы

1. ТИИЭР. Темат. вып.: Спектральное оценивание. 1982. Т. 70. № 9. 308 с.
2. Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991. 200 с.
3. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М.: Радио и связь, 2003. 200 с.
4. Литвинов О.С. Сравнение алгоритмов адаптации с линейными и квадратичными ограничениями весовых коэффициентов в адаптивных антенных решетках // Известия вузов. Радиофизика. 1992. Т. XXXV. № 7. С. 533–539.
5. Литвинов О.С., Поповский В.В. Адаптивные антенные решетки // Проблемы антенной техники: сб. науч. тр. / под ред. Л.Д. Бахраха и Д.И. Воскресенского. М.: Радио и связь, 1989. С. 167–196.
6. Литвинов О.С. Алгоритм сверхразрешения по методу Кейпона при обработке сигналов в адаптивной антенной решетке с неидентичными каналами // Антенны. 2004. Вып. 8–9 (87–88). С. 72–79.
7. Нечаев Ю.Б., Зотов С.А., Макаров Е.С. Сверхразрешающие алгоритмы в задаче азимутальной радиопеленгации с использованием кольцевых антенных решеток // Антенны. 2007. Вып. 7 (122). С. 29–34.
8. Литвинов О.С. Аналитические свойства ковариационной матрицы помех в теории приемных адаптивных решеток // Антенны. 1982. Вып. 30. С. 65–78.

Research of direction-finding pattern formed by linear array antenna with using of the Keipon's algorithm

B.P. Borisov, D.D. Gabrieljan, A.V. Lysenko, L.P. Radio

The potentially obtainable direction-finding pattern characteristics with using of the Keipon's algorithm for linear antenna array are analyzed in the article. There're analytical ratios, establishing relation of antenna parameters (number of elements and element spacing) with direction-finding pattern performance (–3 dB power pattern width and side lobe level).

Keywords: antenna array, superresolution, correlation matrix.