



УДК 621.396.6

О. Г. Вендик, С. А. Калинин, Д. С. Козлов
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование эффективности подавления помехи на основе статистического анализа диаграммы направленности антенной решетки

Исследована эффективность подавления активной радиопомехи на основе статистического анализа диаграммы направленности фазированной антенной решетки. Подавление помехи в заданном направлении осуществлялось путем формирования нулей в диаграмме направленности антенной решетки. Получены кривые распределения вероятности формирования нуля определенной глубины в зависимости от амплитудных и фазовых ошибок.

Адаптивная антенная решетка, фазированная антенная решетка, подавление помехи

Возможность управления формой диаграммы направленности фазированных антенных решеток позволяет активно их использовать в системах связи, радионавигации, радиолокационных станциях. Одной из наиболее сложных задач в теории построения антенных решеток является формирование так называемых нулей – областей с уменьшенным уровнем боковых лепестков, которые могут использоваться для подавления сторонних помех. Существуют различные способы создания управляемого «нуля» в диаграмме направленности. Один из них заключается в использовании антенной решетки, состоящей из двух частей. Первая формирует основную диаграмму направленности, а вторая – диаграмму в направлении помехи. Сигнал второй составляющей вычитается из сигнала первой, что приводит к уменьшению коэффициента усиления антенной решетки в направлении помехи [1]–[3].

Подавление боковых лепестков может быть обеспечено и с помощью одной решетки излучателей со специально подобранным амплитудно-фазовым распределением токов. Требуемое распределение токов вдоль линейки излучателей может быть найдено с помощью различных алгоритмов, например, методом наименьших средних квадратов [4], [5].

На данный момент опубликовано достаточно большое число работ, посвященных синтезу «нулей» в диаграмме направленности антенной решетки. Однако большинство работ рассматривают лишь детерминированную постановку задачи, когда значения комплексных токов излучателей точно определены. В свою очередь, на практике вследствие влияния множества факторов данное условие не выполняется [6].

Синтез диаграммы направленности фазированной антенной решетки. Синтез диаграммы направленности начинается с задания двух углов: положения главного луча и положения нуля. Процедура синтеза, рассмотренная в работах [7]–[9], основана на разложении диаграммы направленности в ряд функций, так называемых синков (функций Котельникова). Зная коэффициенты разложения, можно найти распределение комплексных токов вдоль линейки излучателей с помощью матрицы связи [9]. Полученное распределение амплитуд и фаз токов позволяет построить диаграмму направленности Φ_0 требуемой формы с нулем в направлении помехи от угловой координаты θ , измеряемой в градусах (рис. 1).

Изложенный алгоритм формирования диаграммы направленности антенной решетки был рассмотрен для случая, когда искажения в амплитудно-

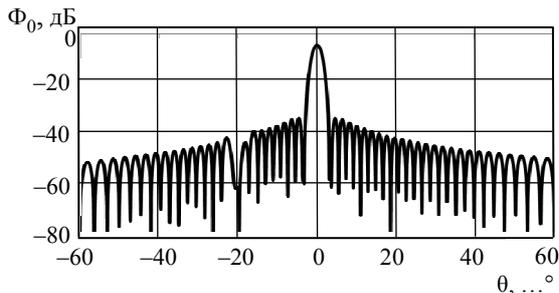


Рис. 1

фазовом распределении токов вдоль решетки излучателей отсутствуют. В реальности амплитудно-фазовое распределение будет искажаться из-за разного рода погрешностей.

Величина погрешностей обусловлена качеством фазовращателей, аттенуаторов и делителя мощности, которые вносят ошибки, связанные с неточностью распределения токов в исходном распределителе каналов, неточностью установки фаз и различными затуханиями в фазовращателях, фазовыми набегам и неточностью коэффициентов передачи аттенуаторов/усилителей и т. д.

Таким образом, необходимо произвести статистический анализ влияния амплитудных и фазовых ошибок на глубину нуля, с целью выработки требований по точности исполнения элементов антенной решетки.

Алгоритм задания ошибок. Провал является наиболее деформируемой частью диаграммы направленности, его глубина может критически изменяться при достаточных отклонениях амплитудно-фазового распределения от исходного [6], [9].

Исходное распределение токов, полученное при синтезе, не содержит ошибок. При появлении погрешностей амплитуды и фазы токов будут определяться выражениями

$$I_{q \text{ error}} = I_q + \Delta I_q;$$

$$\Phi_{q \text{ error}} = \Phi_q + \Delta \Phi_q,$$

где ΔI_q и $\Delta \Phi_q$ – погрешности установки амплитуды и фазы токов в излучателях.

Соответственно, ΔI_q и $\Delta \Phi_q$ лежат в диапазонах $[-\Delta I_{q \text{ max}}, \Delta I_{q \text{ max}}]$ и $[-\Delta \Phi_{q \text{ max}}, \Delta \Phi_{q \text{ max}}]$, где $\Delta I_{q \text{ max}}$ и $\Delta \Phi_{q \text{ max}}$ – максимальные отклонения I_q и Φ_q . Значения ΔI_q и $\Delta \Phi_q$ представляют собой случайные числа, лежащие в указанных пределах. Данные числа получены с использованием встроенной функции MathCAD $\text{rnd}(x)$.

Примеры диаграмм направленности при наличии ошибок Φ_1 приведены на рис. 2 (а, б) для различных вариантов случайных чисел ΔI_q и $\Delta \Phi_q$ при одинаковых исходных параметрах $\Delta I_{q \text{ max}}$ и $\Delta \Phi_{q \text{ max}}$.

На рис. 2 ξ_n и $\xi_{n'}$ – глубина провала (n и n' – номера пар ошибок ΔI_q и $\Delta \Phi_q$).

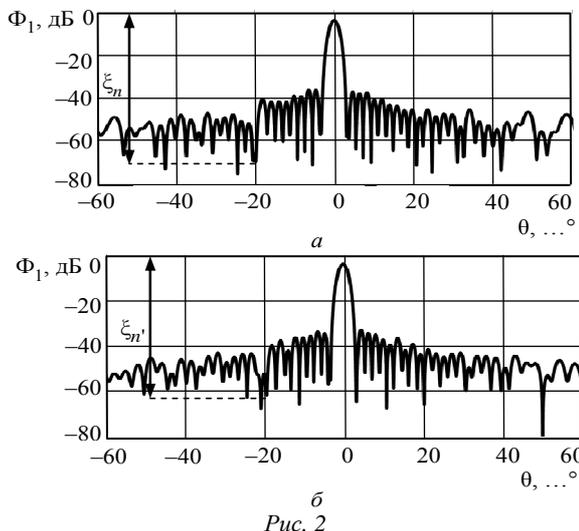


Рис. 2

Анализ деформации нулей. Можно построить кривые распределения вероятности формирования нулей определенной глубины. С этой целью для каждой пары ошибок ΔI_q и $\Delta \Phi_q$ было произведено 100 испытаний и получена выборка из 100 значений глубины провала. Затем выборка была упорядочена по возрастанию или, другими словами, было произведено ранжирование статистических данных по неубыванию и в результате были получены возрастающие зависимости глубины провала как функции от новых номеров для соответствующих пар ошибок. Такие зависимости носят название вариационных рядов. Пример графического представления вариационного ряда приведен на рис. 3.

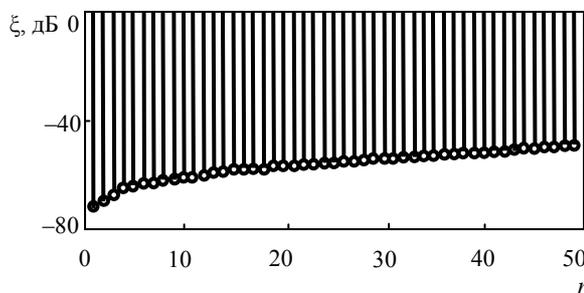


Рис. 3

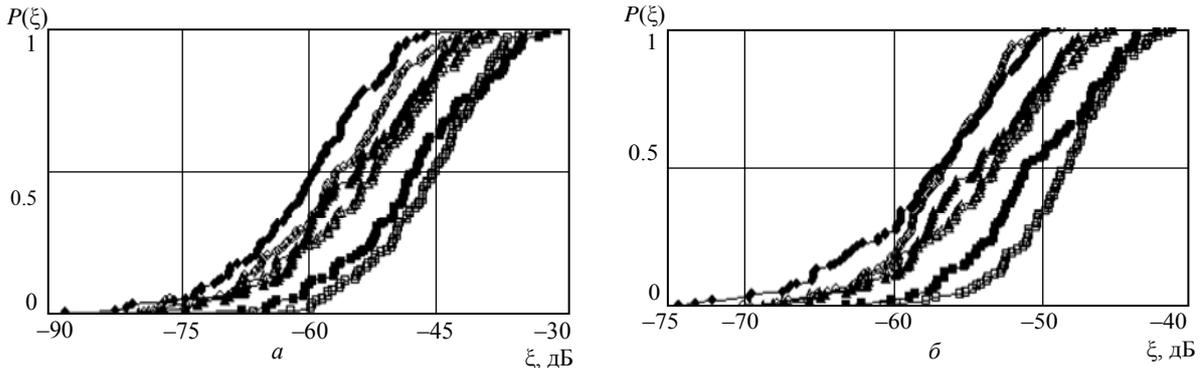


Рис. 4

Вероятность каждого элемента/события в выборке или вариационном ряде $p_i = 1/N$, где N – число элементов в выборке/вариационном ряде. В данном случае $N = 100$ и, соответственно, $p_i = 1/N = 0.01$. Таким образом, выборочная вероятность наступления первого элемента/события вариационного ряда равна 0.01, выборочная вероятность наступления первых двух элементов/событий вариационного ряда – 0.02, первых трех – 0.03 и т. д. Таким образом, на основании вариационных рядов можно построить выборочные распределения вероятности глубин нулей.

Выборочные распределения вероятности формирования провала определенной глубины были построены для случаев чисто фазового (ЧФ) управления и амплитудно-фазового (АФ) управления [9]: в первом случае – при максимальных погрешностях установки фазы $\Delta\varphi_{q_{\max}}$, равных, соответственно, 0.5, 1.0 и 2.0°, при постоянной амплитудной ошибке $\Delta I_{q_{\max}}$ в 0.2 дБ (рис. 4, а), а во втором случае – при максимальных амплитудных ошибках $\Delta I_{q_{\max}}$, равных, соответственно, 0.1, 0.2 и 0.4 дБ, при постоянной фазовой ошибке $\Delta\varphi_{q_{\max}}$ в 1.0° (рис. 4, б).

Таким образом, из рис. 4 видно, что при увеличении ошибок средняя глубина провала уменьшается.

Выборочные распределения вероятности показывают, с какой вероятностью глубина нуля будет не хуже, чем некая заданная величина при определенных максимальных ошибках.

Теперь рассчитаем математические ожидания и среднеквадратичные отклонения для каждой выборки [10]. Вычисления производились по следующим формулам:

$$MO = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi_n,$$

$$СКО = \sqrt{D} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\xi_n - MO)^2},$$

где MO – математическое ожидание; D – дисперсия; $СКО$ – среднеквадратичное отклонение; ξ_n – n -й элемент выборки/ вариационного ряда.

Числовые значения величин MO и $СКО$ при определенных амплитудных $\Delta I_{q_{\max}}$ и фазовых $\Delta\varphi_{q_{\max}}$ ошибках представлены в таблице.

Зависимости MO и $СКО$ от фазовых ошибок при постоянных амплитудных ошибках приведены на рис. 5 (а, б) соответственно. Зависимости MO и $СКО$ от амплитудных ошибок при постоянных фазовых ошибках приведены на рис. 6 (а, б).

Из рис. 5 (а, б) видно, что при увеличении ошибки средняя глубина провала уменьшается.

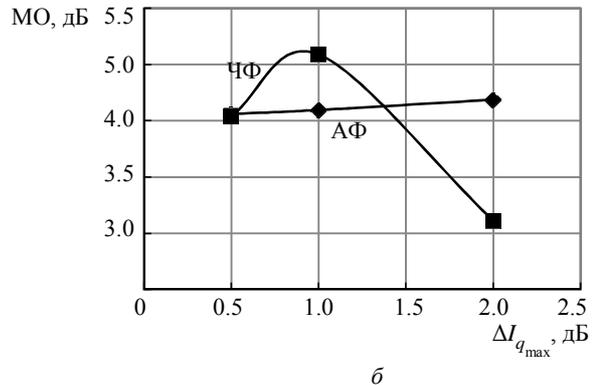
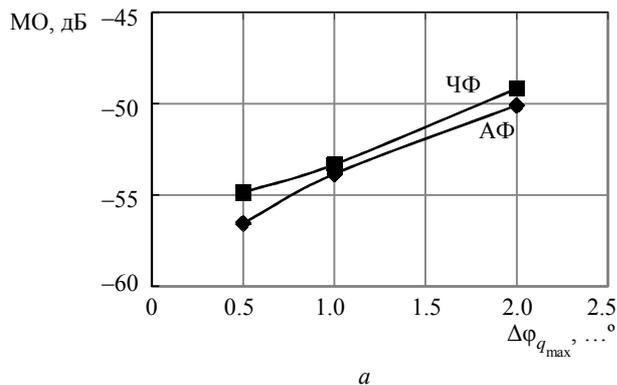


Рис. 5

| $\Delta\varphi_{q_{\max}}, \dots^\circ$ | Управление | $\Delta I_{q_{\max}}, \text{дБ}$ | | | | | |
|---|------------|----------------------------------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | | 0.1 | | 0.2 | | 0.4 | |
| | | МО | СКО | МО | СКО | МО | СКО |
| 0.5 | АФ | – | – | –56.544 | 4.56 | – | – |
| | ЧФ | – | – | –54.848 | 4.543 | – | – |
| 1 | АФ | –56.678 | 5.318 | –53.844 | 4.596 | –49.914 | 4.289 |
| | ЧФ | –55.814 | 3.863 | –53.322 | 5.089 | –48.21 | 3.58 |
| 2 | АФ | – | – | –50.082 | 4.687 | – | – |
| | ЧФ | – | – | –49.178 | 3.611 | – | – |

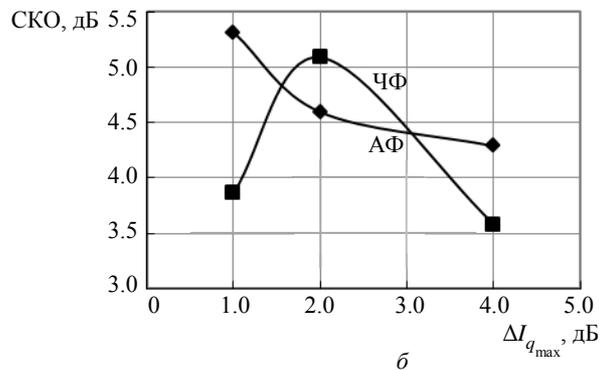
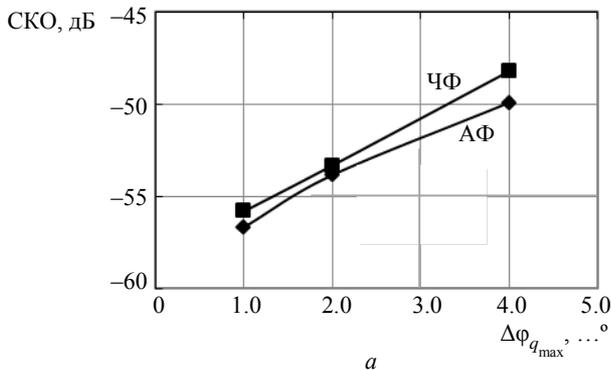


Рис. 6

Из рис. 6 (а, б) видно, что при разных ошибках дисперсия остается практически постоянной. Это означает, что изменяется только положение кривой выборочного распределения вероятности, а форма остается практически неизменной.

В заключение отметим, что в данной статье была рассмотрена процедура статистического анализа глубины нуля, формируемого в диаграмме направленности антенной решетки, при различных уровнях амплитудных и фазовых ошибок. Было проведено сравнение двух методов управления диа-

граммой направленности: амплитудно-фазового и чисто фазового. Амплитудно-фазовое по сравнению с чисто фазовым управлением позволяет получить более глубокий провал при одних и тех же уровнях ошибок, однако данный метод более сложен в реализации, поскольку требует использования дополнительных аттенуаторов.

Проведенный анализ влияния уровня ошибок на глубину нулей в диаграмме направленности позволил выдвинуть требования к необходимой точности исполнения элементов антенной решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Appelbaum S. P. Adaptive Arrays // IEEE Trans. on AP. 1976. Vol. AP-24, № 5. P. 585–598.
2. Monzingo R. A., Miller T. W. Adaptive Arrays. New York: John Wiley and Sons, 1980. 446 p.
3. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. Boston, London: Artech House, 1994. 496 p.
4. Chu Y., Fang W.-H. A Novel Wavelet-Based Generalized Side lobe Cancell // IEEE Trans. on AP. 1999. Vol. AP-47, № 9. P. 1485–1494.
5. Mouhamadou M., Vaudon P. Smart Antenna Array Patterns Synthesis: Null Steering and Multu-user Beam Forming by Phase Control // Progress In Electromagnetics Research, PIER. 2006. Vol. 60. P. 95–106.
6. Кондратьев А. С., Балагуровский В. А., Маничев А. О. Методы фазового синтеза нулей в диаграмме направленности фазированной антенной решётки при наличии случайных погрешностей исходных данных и ошибок управления амплитудно-фазовым

- распределением // IV Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь». М.: Информпресс-94, 2010. С. 556–561.
7. Vendik O. G., Kozlov D. S. Phased Antenna Array with a Side Lobe Cancellation for Suppression of Jamming // IEEE Antennas Wireless Propag. Lett. 2012. Vol. 11. P. 648–650.
8. Вендик О. Г., Калинин С. А. Козлов Д. С. Фазированная антенная решетка с управляемой формой диаграммы направленности // Журн. техн. физики. 2013. Т. 83, № 10. С. 117–121.
9. Influence of Mutual Coupling and Current Distribution Errors on Advanced Phased Antenna Array Nulling Synthesis / O. G. Vendik, D. S. Kozlov, M. D. Parnes, A. I. Zadorozhnyy, S. A. Kalinin // Open J. of Antennas and Propagation. 2013. Vol. 1, № 3. P. 35–43.
10. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. 6-е изд. перераб. и доп. М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит., 1988. 225 с.

O. G. Vendik, S. A. Kalinin, D. S. Kozlov
Saint-Petersburg state electrotechnical university «LETI»

INVESTIGATION OF JAMMING SUPPRESSION EFFICIENCY BASED ON STATISTICAL ANALYSIS OF ANTENNA ARRAY PATTERN

The investigation of the jamming suppression efficiency based on the statistical analysis of the radiation pattern of the phased antenna array is presented. The jamming rejection is achieved by the side lobe cancellation in the required direction. Probability distribution of the certain depth nulling as a function of the amplitude and phase errors were obtained.

Adaptive antenna array, phased antenna array, jamming suppression
