

СИНТЕЗ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ РЛС С ЗОНОЙ ПОДАВЛЕНИЯ, ВКЛЮЧАЮЩИЙ АНАЛИЗ ОШИБОК В РАСПРЕДЕЛЕНИИ ТОКОВ.

О. Г. Вендик, Д. С. Козлов, С.А. Калинин

В статье предложены две процедуры синтеза диаграммы направленности фазированной антенной решетки, направленные на подавление боковых лепестков в требуемом направлении. Рассмотренные алгоритмы основаны на формировании определенного амплитудно-фазового распределения токов вдоль решетки излучателей. Проведен анализ искажений диаграммы направленности, вызванных амплитудно-фазовыми ошибками тока.

Адаптивная антенная решетка, фазированная антенная решетка, подавление помехи

Управляемость диаграммы направленности фазированных антенных решеток расширяет область их использования в системах связи, радионавигации, радиолокационных станциях. Важной задачей является формирование области с подавленными боковыми лепестками (провала), которая может использоваться для подавления сторонней помехи. Существуют несколько способов создания управляемого провала в диаграмме направленности. Первый метод заключается в использовании антенной решетки, состоящей из двух составляющих. 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].

Однако подавление боковых лепестков может быть обеспечено одной решеткой излучателей со специально подобранным амплитудно-фазовым распределением токов. Для нахождения требуемого амплитудно-фазового распределения часто используются различные алгоритмы, например, метод наименьших средних квадратов [4, 5].

Разложение диаграммы направленности в ряд по функциям Котельникова.

Для упрощения синтеза диаграмма направленности может быть разложена в ряд функций, так называемых синков (функций Котельникова), образующих ортогональную систему [6 - 9]:

$$F(u) = \sum_{p=0}^{M-1} N_p \cdot \frac{\sin(M \cdot u - \pi \cdot p)}{M \cdot u - \pi \cdot p}. \quad (1)$$

Здесь $u = \pi d \cdot \sin(\theta) / \lambda$, M - число излучателей, которые образуют эквидистантную антенную решетку, d - расстояние между соседними излучателями, λ - длина волны в свободном пространстве, N_p - коэффициенты разложения, θ - угловая координата.

Согласно (1) коэффициенты разложения N_p могут быть найдены, если определена форма диаграммы направленности. Зная коэффициенты разложения N_p , можно найти распределение токов вдоль решетки излучателей, принимая во внимание, что диаграмма направленности может быть представлена как в форме (1), так и в обычной:

$$F(u) = \sum_{q=0}^{M-1} I_q \cdot e^{j\varphi_q} \cdot \exp\left[i \cdot 2u \cdot \left(q - \frac{M-1}{2}\right)\right], \quad (2)$$

где I_q и φ_q - амплитуды и фазы комплексных токов \tilde{I}_q в q -х излучателях.

Количество \tilde{I}_q совпадает с числом коэффициентов разложения N_p и определяется как:

$$\tilde{I}_q = \sum_{p=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} M_{q,p} N_p, \quad (3)$$

$$M_{q,p} = \exp\left[i\pi p \left(1 - \frac{1}{M} - \frac{2q}{M}\right)\right], \quad (4)$$

Синтез распределения тока при формировании «нуля» в диаграмме направленности. Для того, чтобы продемонстрировать формирование диаграммы направленности с провалом мы использовали в качестве исходного распределение токов $I_q^{(0)}$ (Рис. 1 а), которое часто используется в фазированных антенных решетках:

$$I_q^{(0)} = \cos^2\left(\frac{q - \frac{M-1}{2}}{M-1} \pi\right) + 0.2, \quad (5)$$

где q – номер излучателя ($q = 0, 1 \dots M-1$). Для всех последующих вычислений $M = 63$.

Распределение токов $I_q^{(0)}$ формирует диаграмму направленности F_0 (Рис. 1 б).

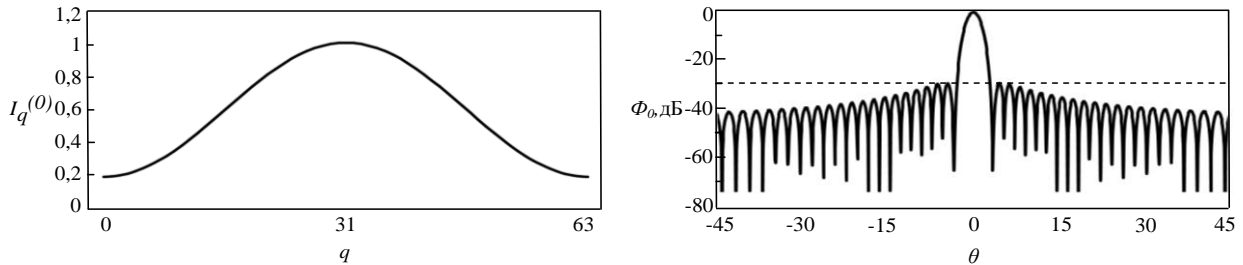


Рисунок 1.

Для управления процедурой формирования луча, мы использовали диаграмму направленности в следующем виде:

$$F_1(u) = F_0(u - u_0) \cdot Z(u, u_z, \delta), \quad (6)$$

$$Z(u, u_z, \delta) = \begin{cases} a, & \text{if } u_z - \delta < u < u_z + \delta \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (7)$$

Положение главного луча определяется параметром u_0 , положение провала - u_z , параметр δ задает только ширину провала и не влияет на его положение. Глубина провала характеризуется параметром a . Для того чтобы положения главного луча и провала были

не зависимы, необходимо существенно уменьшить взаимное влияние между соседними излучателями. Существуют разнообразные методы компенсации взаимного влияния с помощью введения в схему питания излучателей матрицы взаимной связи [10].

Амплитуда и фаза токов $I_q^{(1)}$ и $\varphi_q^{(1)}$ могут быть найдены с помощью выражений (3) и (4) (Рис. 2).

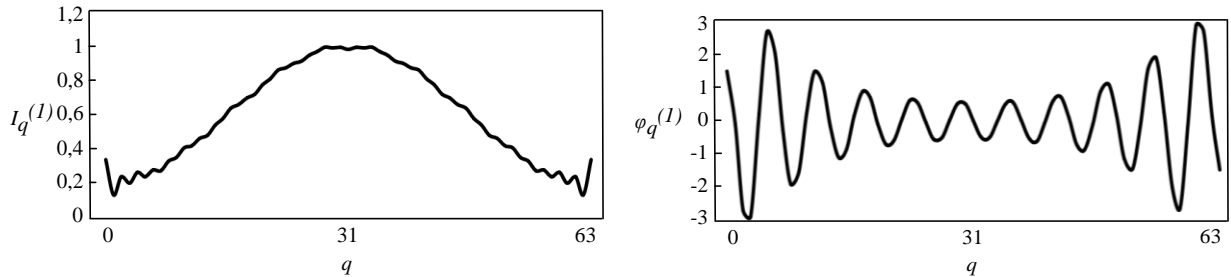


Рисунок 2.

Рассчитанные значения амплитуды и фазы токов $I_q^{(1)}$ и $\varphi_q^{(1)}$ определяют форму диаграммы направленности, изображенной на Рис. 3 а.

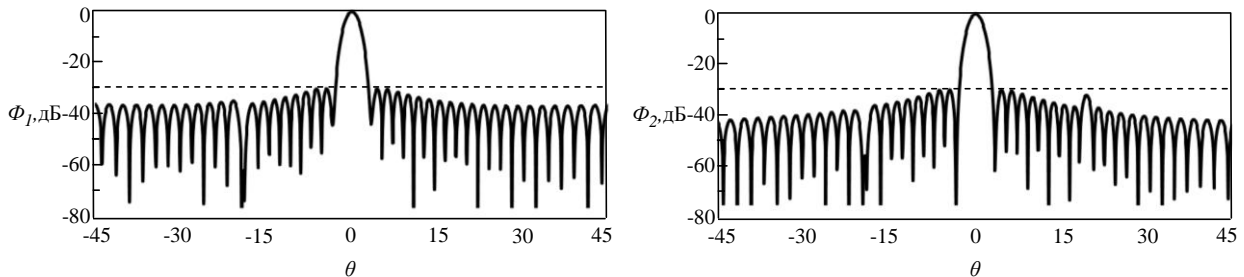


Рисунок 3.

Упрощенная схема антенной решетки с возможностью подавления боковых лепестков состоит из линейки излучателей, наборов аттенюаторов и фазовращателей, а также делителя мощности. Делитель мощности задает исходное распределение токов. Аттенюаторы и фазовращатели используются соответственно для регулировки амплитуд и формирования требуемых фазовых сдвигов.

Формирование «нуля» в диаграмме направленности за счет чисто фазового управления. Синтез диаграммы направленности с провалом в заданном направлении был представлен в предыдущих частях этой статьи. Предложенная процедура требует изменения фаз и амплитуд токов вдоль решетки излучателей. Это ведет к необходимости использования аттенюаторов, что в результате сказывается на сложности и стоимости всей системы. По этой причине было предложено использовать исходное амплитудное распределение и подвергать изменениям только лишь фазы токов согласно описанному выше алгоритму. Таким образом, конечная диаграмма направленности определяется как:

$$F_2(u) = \sum_{q=0}^{M-1} I_q^{(0)} \cdot e^{j\varphi_q^{(1)}} \cdot \exp\left[i \cdot 2u \cdot \left(q - \frac{M-1}{2}\right)\right], \quad (8)$$

где $I_q^{(0)}$ - исходное амплитудное распределение токов вдоль решетки, а $\varphi_q^{(1)}$ - фазовое

распределение, полученное в результате вычислений согласно процедуре синтеза.

Диаграмма направленности, построенная таким образом, изображена на Рис. 3 б. В этом случае положение и глубина провала не изменились, однако появился дополнительный "выброс".

Следует отметить, что связь между глубиной провала и высотой "выброса" может быть изменена. В данной статье мы стремились получить максимально возможную глубину провала. В этом случае высота "выброса" составила порядка 6 дБ над уровнем боковых лепестков. При использовании данной процедуры синтеза, основанного на чисто фазовом управлении, аттенюаторы могут не использоваться.

Влияние ошибок амплитудно-фазового распределения тока на формирование диаграммы направленности. Изложенный выше алгоритм формирования диаграммы направленности антенной решетки был рассмотрен для случая, когда искажения в амплитудно-фазовом распределении токов вдоль решетки излучателей отсутствуют. В реальности амплитудно-фазовое распределение будет искажаться из-за разного рода погрешностей.

Величина погрешностей обусловлена качеством фазовращателей, аттенюаторов и делителя мощности. В случае чисто фазового управления погрешности, связанные с качеством аттенюаторов, могут быть исключены из расчетов.

Как следует из рисунка 2, формирование провала в диаграмме направленности вызвано небольшими искажениями амплитудно-фазового распределения токов. Рассмотрим, как будет изменяться форма исходной диаграммы направленности под влиянием погрешностей. В качестве исходной была выбрана диаграмма направленности, изображенная на Рис. 3 а.

Будем считать, что исходное распределение тока $I_q^{(0)}$ формируется делителем мощности без искажений. Если считать, что \tilde{I}_q из выражения (3) точно заданное значение комплексного тока в q -ом излучателе, то при появлении погрешностей амплитуда и фаза тока будут определяться следующими выражениями:

$$I_{q \text{ error}} = I_q + \Delta I_q, \quad (9)$$

$$\varphi_{q \text{ error}} = \varphi_q + \Delta \varphi_q, \quad (10)$$

где ΔI_q и $\Delta \varphi_q$ - погрешности установки амплитуды и фазы токов в излучателях. Соответственно ΔI_q и $\Delta \varphi_q$ лежат в диапазонах $[-\Delta I_{q \text{ max}}, \Delta I_{q \text{ max}}]$ и $[-\Delta \varphi_{q \text{ max}}, \Delta \varphi_{q \text{ max}}]$, где $\Delta I_{q \text{ max}}$ и $\Delta \varphi_{q \text{ max}}$ - максимальные отклонения I_q и φ_q . Значения ΔI_q и $\Delta \varphi_q$ представляют собой наборы случайных чисел, лежащие в указанных пределах и полученные с использованием встроенной функции MathCAD $\text{rnd}(x)$ [11]. Для учета влияния погрешностей на форму диаграммы направленности значения $I_{q \text{ error}}$ и $\varphi_{q \text{ error}}$ должны быть заменены в выражении (2).

Провал является наиболее деформируемой частью диаграммы направленности. Глубина провала ζ_{dB} может критически изменяться при достаточных отклонениях амплитудно-фазового распределения от исходного. Для оценки искажения глубины

провала от величины погрешностей был построен набор диаграмм направленностей, соответствующих различным, случайно определенным величинам погрешностей. Далее по полученному множеству диаграмм строилось распределение вероятностей $f(x)$ реализации провала глубиной ξ_{dB} при заданном значении параметра δ . Подобные зависимости были построены для случая чисто фазового управления при максимальных отклонениях установки фазы $\Delta\varphi_{q\max}$, равных соответственно $0,5^\circ$, $1,0^\circ$ и $2,0^\circ$ (Рисунок 4).

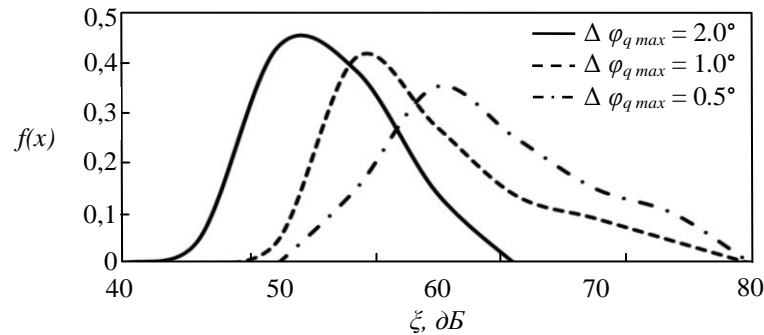


Рисунок 4.

В заключение отметим, что в данной статье был изложен синтез диаграммы направленности антенной решетки. Данная процедура позволяет независимо управлять положениями главного луча и провала, в направлении которого осуществляется подавление помехи. Было проведено сравнение двух методов управления диаграммой направленностью: амплитудно-фазового и чисто фазового. Амплитудно-фазовое управление позволяет получить диаграмму направленности без «выброса», однако данный метод более сложен в реализации, поскольку требует использования дополнительных аттенуаторов.

Авторы сердечно благодарят Михаила Давыдовича Парнеса за формулирование проблемы и плодотворные дискуссии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S.P. Appelbaum, “Adaptive Arrays”, *IEEE Trans. on AP*, vol. AP-24, No. 5, pp. 585- 598. (1976).
- [2] R.A. Monzingo and T.W. Miller, “Adaptive Arrays” *John Wiley and Sons, New York*, (1980)
- [3] R.J. Mailloux, “Phased Array Antenna Handbook”. *Boston, London Artech House*. (1994).
- [4] Y Chu and W-H Fang, “A Novel Wavelet-Based Generalized Side lobe Canceller”, *IEEE Trans. on AP*, vol. AP-47, No. 9, pp. 1485- 1494.(1999).
- [5] M. Mouhamadou and P. Vaudon “Smart Antenna Array Patterns Synthesis: Null Steering and Multu-user Beam Forming by Phase Control”, *Progress In Electromagnetics Research*, PIER, vol. 60, pp. 95–106, (2006).
- [6] P. M. Woodward, “A Method of Calculating the Field over a Plane Aperture Required to produce a Given Polar Diagram”, *Journal I.E.E. (London)*, 1947, vol. 93, part IIIA, pp. 1554 – 1558.
- [7] P.M. Woodward and J.D. Lawson, “The theoretical precision with which an Arbitrary Radiation-pattern may be Obtained from a Source of Finite Size”, *Proc. IRE*, 1948, vol. 95, pt. 3, pp. 362 - 370.
- [8] O.G. Vendik, “Synthesis of a line antenna array with non-mechanical scanning” (in Russian), *Izvestiya vuzov: Radiotekhnika*, No.1, 1960, pp. 77-86.
- [9] O.G. Vendik, D.S. Kozlov, ” Phased Antenna Array with a Side Lobe Cancellation for Suppression of Jamming”, *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 648–650, (2012).
- [10] К.А. Баланис, П.И. Ионидес, «Введение в смарт антенны», перевод с англ. под ред. В.В. Попова и М.Д. Парнеса, М.: ТЕХНОСФЕРА. 2012.
- [11] www.mathcad.com.