

Адаптивная фазированная антенная решетка с зоной подавления в диаграмме направленности в направлении помехи

В статье представлена процедура управления лучом адаптивной антенной решетки, обеспечивающей формирование зоны подавления в диаграмме направленности в направлении помехи. Продемонстрирован пример формирования требуемой диаграммы направленности и соответствующее ей амплитудно-фазовое распределение токов вдоль решетки излучателей.

Ключевые слова: адаптивная антенная решетка, фазированная антенная решетка, подавление помехи

В данной статье продемонстрирована простая процедура синтеза амплитудно-фазового распределения токов в излучателях антенной решетки, с помощью которой достигается уменьшение влияния сторонних помех. Существуют различные методики, применяемые при борьбе с помехами [1]. Как правило, требуемая форма диаграммы направленности антенной решетки, работающей при наличии помехи, получается путем вычитания дополнительной диаграммы, главный луч которой направлен на источник помех, из основной. За счет этого коэффициент усиления антенны значительно ослабляется в направлении источника помех [2]. Однако этот подход требует разработки двух отдельных, одновременно управляемых, специально спроектированных антенных решеток. Данных недостатков лишен изложенный ниже метод, основанный на использовании лишь одной антенной решетки со специально подобранным амплитудно-фазовым распределением. Для упрощения синтеза было предложено разложить диаграмму направленности в ряд функций, так называемых синков (Функций Котельникова). Такая антенная решетка может использоваться в помехозащищенной системе связи, радиолокационной станции или же GPS-приемнике [3, 4].

Разложение диаграммы направленности в ряд по функциям Котельникова. Диаграмма направленности $F(u)$ может быть представлена в следующем виде [3]:

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

где

$$u = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta. \quad (2)$$

Здесь d – расстояние между соседними излучателями, M – число элементов в линейке излучателей, λ – длина волны, θ – угол между главным лучом и нормалью к линейке излучателей, а N_p – отсчеты Котельникова.

Согласно (1) с помощью системы отсчетов N_p может быть задана форма диаграммы направленности.

Отправной точкой синтеза антенной решетки является определение требуемой формы диаграммы направленности $F_0(u)$. Довольно часто она задается в виде полинома Чебышева [2, 5]:

$$F_0(u) = T_M(u, z_0), \quad (3)$$

где

$$T_M(u, z_0) = \begin{cases} \cos[M \cdot \arccos(z_0 \cdot \cos(u))], & z_0 \cdot \cos(u) < 1 \\ \cosh[M \cdot \arccos(z_0 \cdot \cos(u))], & z_0 \cdot \cos(u) > 1 \end{cases} \quad (4)$$

Параметр z_0 был введен Дольфом [5] для задания уровня боковых лепестков по отношению к максимуму главного луча. Использование полинома Чебышева достаточно удобно, однако стоит отметить, что вместо него может быть использована любая другая функция. Тот или иной вид функции определяется, прежде всего, требуемой формой диаграммы направленности.

Отсчеты Котельникова могут быть найдены с помощью выражения (5):

$$N_p^{(0)} = \frac{1}{\pi} \cdot \int_{-R}^R F_0(u) \cdot \frac{\sin(Mu \cdot z_1 - \pi \cdot p)}{Mu \cdot z_1 - \pi \cdot p} du. \quad (5)$$

Здесь коэффициент z_1 используется для того, чтобы сделать периоды полинома Чебышева (4) и данной тригонометрической функции (5) примерно равными.

Система отсчетов Котельникова $N_p^{(0)}$ однозначно определяет распределение комплексных токов в излучателях с номерами q от 0 до $M-1$:

$$\tilde{I}_q^{(0)} = \sum_{p=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} M_{q,p} N_p^{(0)}, \quad (6)$$

где $M_{q,p}$ – компоненты квадратной матрицы:

$$M_{q,p} = \exp \left[i\pi p \left(1 - \frac{1}{M} - \frac{2q}{M} \right) \right]. \quad (7)$$

Соответственно, зная распределение токов в излучателях, мы можем построить диаграмму направленности:

$$F^{(0)}(u) = \sum_{q=0}^{M-1} \tilde{I}_q^{(0)} \cdot \exp \left[i \cdot u \cdot \left(2q - 1 + \frac{1}{M} \right) \right]. \quad (8)$$

Таким образом, мы рассматриваем не только диаграмму направленности $F_0(u)$, но и систему отсчетов, а также распределение комплексных токов в излучателях.

Предложенный алгоритм проиллюстрирован графиками на Рис. 1 – Рис. 3, которые получены при $z_0 = 1.01$, $z_1 = 1.04$ и $M = 27$. В этом случае уровень боковых лепестков - $\xi_{dB} = -27$ дБ.

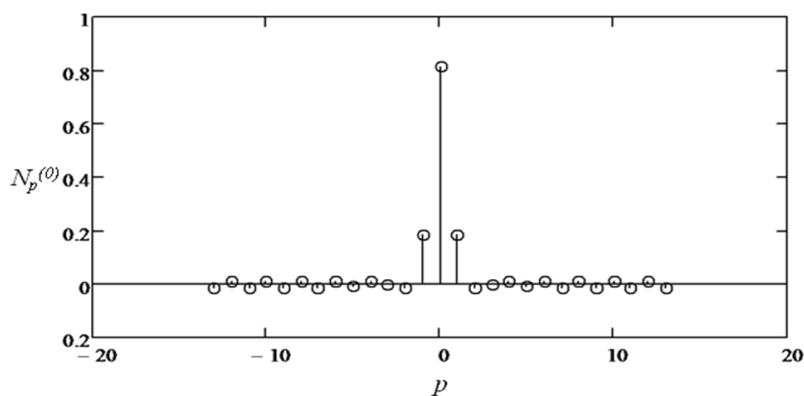


Рис. 1.

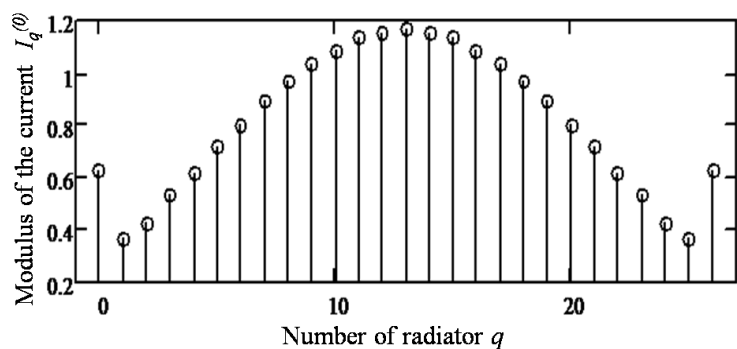


Рис. 2.

На рисунке 1 представлена система отсчетов Котельникова, полученная при подстановке (3) и (4) в (5). На рисунке 2 представлено распределение токов в излучателях, полученное из (6) и (7). В этом случае все токи действительны. Нормированная диаграмма направленности $\Phi_0(u)$ (9), соответствующая такому распределению токов в линейке излучателей, представлена на рисунке 3:

$$\Phi_0(u) = 20 \cdot \log \left[\frac{F^{(0)}(u)}{F^{(0)}(0)} \right]. \quad (9)$$

Как видим, распределение токов и диаграмма направленности хорошо согласуется с классическим синтезом методом Дольф-Чебышева.

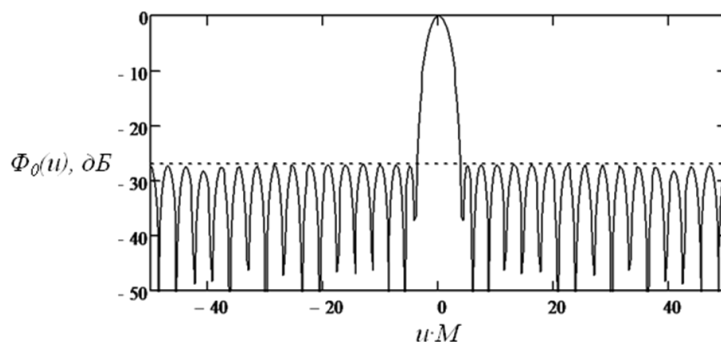


Рис. 3.

Представленный выше пример показывает преимущества метода формирования луча в процессе синтеза антенной решетки, предложенного Вудвартом [3, 6].

Процедура управления положением провала в диаграмме направленности. Для того чтобы управлять процедурой формирования провала, будем использовать диаграмму направленности в следующем виде:

$$F_1(u) = T_M(u, z_0) \cdot Z(u, u_z, \delta), \quad (10)$$

где

$$Z(u, u_z, \delta) = \begin{cases} a, & \text{if } -u_z - \delta < u < -u_z + \delta \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (11)$$

u_z – точка, в которой формируется провал диаграммы направленности, δ – ширина провала, а a – определяет глубину провала. При $a = 1$ – провал отсутствует. Соответственно такое изменение диаграммы направленности приведет к переформированию распределения токов в линейке излучателей.

Были выбраны следующие значения параметров: $z_0 = 1.01$; $z_1 = 1.04$; $M = 27$; $u_z = 1.10$; $\delta = 0.125$; $a = -0.75$. Для данных значений нормированная диаграмма направленности $\Phi_1(u)$, определяемая согласно (10) и (11), представлена на рис. 4.

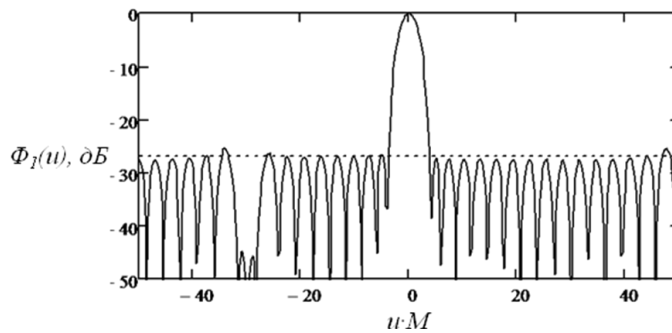


Рис. 4.

Таким образом, для того, чтобы сформировать в диаграмме направленности антенной решетки провал в определенном секторе, необходимо всего лишь изменить модуль и фазу тока в каждом излучателе на строго определенную величину. Модуль может быть изменен введением в систему дополнительных усилителей-аттенюаторов. Как показали расчеты, при уровне ошибки установки модуля тока, равного 0,5 дБ, и уровне ошибки установки фазы, равного 5° , наблюдается лишь незначительные искажения диаграммы направленности.

Процедура управления положением основного луча. Фазированная антенная решетка характеризуется отклонением главного луча от центрального положения. Положение главного луча определяется параметром u_0 , который может быть включен в выражение для диаграммы направленности:

$$F_2(u, u_0) = T_M(u, u_0, z_0) \cdot Z(u, u_z, \delta), \quad (12)$$

где

$$T_M(u, u_0, z_0) = \begin{cases} \cos[M \cdot \arccos(z_0 \cdot \cos(u - u_0))] & z_0 \cdot \cos(u - u_0) < 1 \\ \cosh[M \cdot \arccos(z_0 \cdot \cos(u - u_0))] & z_0 \cdot \cos(u - u_0) > 1 \end{cases}. \quad (13)$$

Положение же провала по-прежнему определяется u_z . Соответственно данные параметры, определяющие положения основного луча и провала, являются независимыми.

Положение провала на рис. 5 остается тем же, что и на рис. 4, что объясняется

одинаковым значением параметра u_z . А положения главного максимума для двух данных случаев различны, что в свою очередь объясняется различными значениями параметра u_0 . В этом случае главный луч отклонен, а распределение фазы токов $\arg(I_q^{(2)})$ в излучателях изменяется линейно.

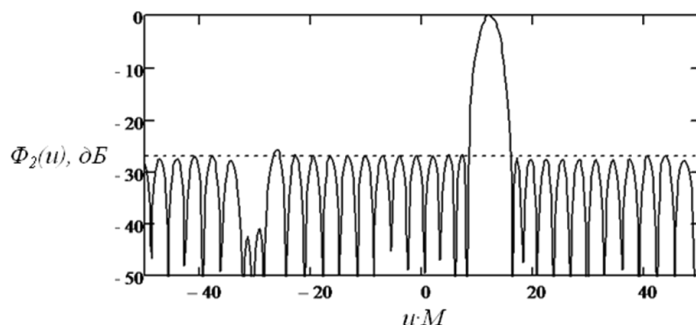


Рис. 5.

В заключение отметим, что в данной статье был предложен алгоритм синтеза адаптивной антенной решетки с подавлением уровня боковых лепестков в заданном направлении. Были рассмотрены независимые процедуры управления положениями основного луча и провала диаграммы направленности, а также сделана оценка допустимого уровня ошибок при задании требуемого распределения токов.

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

Библиографический список

- [1] Пистолькорс А. А., Литвинов О. С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991.
- [2] Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. Boston, London Artech House. (1994).
- [3] Woodward P.M., Lawson J.D. 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.
- [4] Mukhopadhyay M., Sarkar B. K., Chakraborty A., Augmentation of Anti-Jam GPS System Using Smart Antenna with a Simple DOA Estimation Algorithm // *Progress In Electromagnetics Research, PIER*, vol. 67, pp. 231–249, (2007).
- [5] Dolph C. L. A Current Distribution for Broadside Arrays which Optimizes the Relationship between Beam Width and Side-Lobe Level // *Proceedings of the I.R.E. and Waves and Electrons*, June 1946, pp. 335 – 348.
- [6] Вендик О.Г. Синтез линейки излучателей с немеханическим качанием луча // **Изв. Вузов, Радиотехника**, том. 3, вып. 1, стр. 77-81, 1960.