

Фазированная антенная решетка с управляемой формой диаграммы направленности

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

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ogvendik@rambler.ru, ds_kozlov@list.ru.

(Поступило в Редакцию 24 декабря 2013 г. В окончательной редакции 21 марта 2013 г.)

Рассмотрено нахождение амплитудно-фазового распределения токов в излучателях, при котором осуществляется независимое управление главным лучом антенны и провалом в диаграмме направленности антенны, в котором резко снижено усиление антенны. Задача решена с помощью управления амплитудами и фазами волн, излученных системой излучателей. Формирование главного луча и введения в диаграмму направленности провала осуществлено с использованием синтеза комплексных амплитуд токов в излучателях.

Введение

Фазированная антенная решетка — это система излучателей, амплитуда и фаза токов в которых может быть подобрана так, что в силу интерференции излученных ими волн суммарное излучение формируется в виде остронаправленного луча. Направление и форма луча могут изменяться за счет подбора амплитудно-фазового распределения токов в излучателях. Ниже рассмотрим одну из интереснейших задач теории фазированных антенных решеток или теории интерференции, в общем смысле важную задачу радиофизики. Эта задача — нахождение амплитудно-фазового распределения токов в излучателях, при котором осуществляется независимое управление главным лучом антенны и провалом в диаграмме направленности антенны, в котором резко снижено усиление антенны. Решение этой задачи важно с точки зрения практического приложения, так как позволяет подавить источник организованной помехи.

Антенну с управляемой формой диаграммы направленности обычно называют адаптивной антенной или в обсуждаемом случае адаптивной антенной решеткой [1]. Диаграмма направленности адаптивной антенной решетки, работающей при наличии помехи, образуется при помощи двух диаграмм: основной и дополнительной. Суммарная диаграмма направленности получается путем вычитания дополнительной диаграммы из основной. За счет этого коэффициент усиления антенны значительно ослабляется в направлении источника помех [2–4]. Этот метод требует разработки двух одновременно управляемых антенных решеток. Подобных недостатков лишен метод, основанный на уменьшении уровня боковых лепестков в заданном направлении, что может быть достигнуто использованием лишь одной антенной решетки со специально подобранным амплитудно-фазовым распределением. Для нахождения такого специального амплитудно-фазового распределения часто используются различные алгоритмы, например метод наименьших средних квадратов [5,6]. Сформулированная выше задача о независимом управлении главным лучом антенны и

провалом в диаграмме направленности, строго говоря, не является задачей о разработке адаптивной антенной решетки, поскольку не включает в рассмотрение цепей отрицательной обратной связи, которые обеспечили бы адаптацию антенны к внешним условиям [7]. Тем не менее предложенная схема формирования „провала“ в направлении помехи может быть использована как существенная часть полноценной адаптивной антенной системы.

Для упрощения алгоритмов было предложено [8–10] разложить диаграмму направленности в ряд по функциям Котельникова, так называемым „синкам“. Подобная антенная решетка может использоваться в помехозащищенных системах связи, в радиолокационных станциях или же в GPS-приемниках [11].

Ниже рассмотрим только способ управления диаграммой направленности антенны. Все изложенное может быть использовано в конкретных конструкциях, работающих в широком частотном диапазоне.

1. Исходное распределение токов и соответствующая ему диаграмма направленности

Рассмотрим фазированную антенную решетку с распределением амплитуд токов в разделителе каналов в виде „косинус с пьедесталом“, определяемым формулой (1) и представленным на рис. 1, а.

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

Здесь M — число излучателей в линейке, $q = 0, 1, 2, \dots, M-1$. В конкретном случае положим $M = 63$

$$F(u) = \sum_{q=0}^{M-1} \left[(|I_q|) \exp(i \arg(I_q)) \times \exp \left(i 2(u - u_0) \left(q - \frac{M-1}{2} \right) \right) \right]. \quad (2)$$

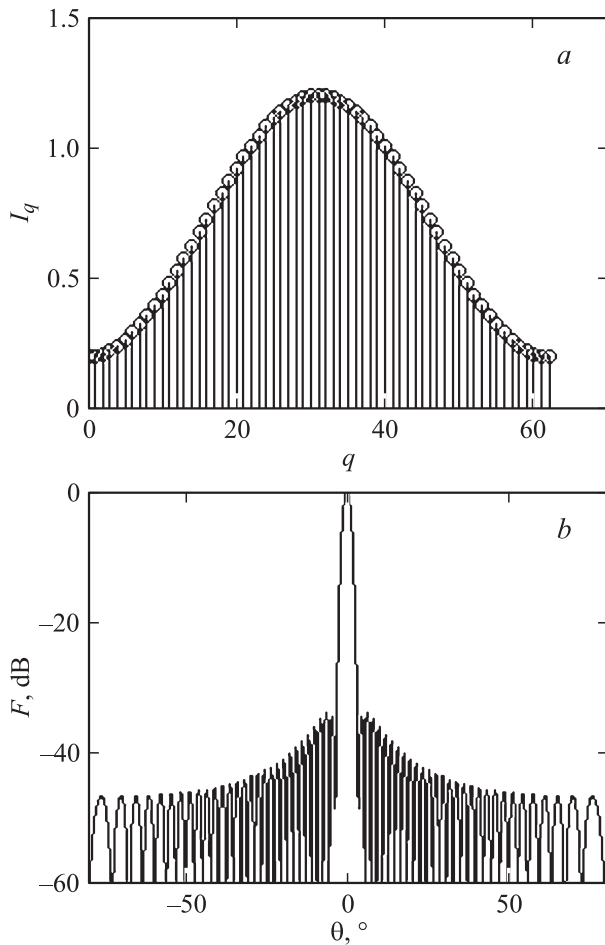


Рис. 1. Исходное распределение токов (а) и исходная диаграмма направленности (b).

Чтобы получить в удобном виде диаграмму направленности, следует осуществить переход от обобщенной координаты u угловой координате θ :

$$u = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta, \quad (3)$$

где d — расстояние между соседними излучателями, λ — длина волны.

Диаграмма направленности как функция θ представлена на рис. 1, b.

2. Процедура управления диаграммой направленности

Управление диаграммой направленности начинается с того, что задаются положение главного луча антенны α и положение провала β . Далее эти параметры пересчитываются из угловой координаты θ в координату u по следующим формулам:

$$u_0 = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \alpha, \quad (4)$$

$$u_z = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \beta. \quad (5)$$

Для получения провала в диаграмме направленности функция $F(u)$ умножается на функцию $Z(u)$:

$$Z(u) = \begin{cases} a & \text{if } u_z - \frac{\delta}{2} < u < u_z + \frac{\delta}{2}, \\ 1 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

где $\delta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \gamma$, γ — ширина провала в градусах.

Параметр a — определяет глубину провала. При отсутствии провала $a = 1$, при наличии провала параметр a меньше 1. В настоящей работе примем параметр $a = -1$.

В результате перемножения (2) и (6) получаем прообраз диаграммы направленности с провалом (7)

$$TZ(u) = F(u)Z(u). \quad (7)$$

Заметим, что при $a < 0$ соотношение (7) дает не только изменение амплитуды поля в дальней зоне, но изменение его фазы.

Теперь перейдем к синтезу распределения токов, отвечающего диаграмме направленности с провалом (7). В качестве аппарата синтеза используем разложение по функциям Котельникова

$$\psi_p(u) = \frac{\sin(Mu - \pi p)}{Mu - \pi p}, \quad (8)$$

где переменная u определена формулой (3), M — число элементов в линейке излучателей использовано в соотношениях (1) и (2). В зарубежной литературе эти функции часто называют синк-функциями: $\text{Sinc}(u)$.

Использованная система функций является ортогональной, т.е. удовлетворяет следующему соотношению:

$$\begin{aligned} \frac{M}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sin(Mu - \pi p)}{Mu - \pi p} \frac{\sin(Mu - \pi l)}{Mu - \pi l} du \\ = \begin{cases} 1, & p = l, \\ 0, & p \neq l. \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

Из этого следует, что диаграмма направленности может быть разложена в ряд по функциям Котельникова и представлена в следующем виде [7–9]:

$$F(u) = \sum_{p=-\frac{M-1}{2}}^{\frac{M-1}{2}} N_p \frac{\sin(Mu - \pi p)}{Mu - \pi p}, \quad (10)$$

N_p — так называемые отсчеты Котельникова.

Таким образом, отсчеты Котельникова вычисляются по следующей формуле:

$$N(p) = \frac{M}{\pi} \int_{-R}^{+R} TZ(u) \left(\frac{\sin(Mu - \pi p)}{Mu - \pi p} \right) du, \quad (11)$$

где $p = -31, -30, \dots, 31$ (в данном конкретном случае $M = 63$). При $M = 63$ пределы интегрирования можно задать, приняв $R = M/\pi \cong 20$. Значение R можно оценить путем вычисления интеграла (9), в котором в качестве пределов приняты R и $-R$. Вычисление показывает, что при любых целочисленных значениях p и l интеграл в (9) при $R = 20$ отличается от нуля или единицы в большинстве случаев менее чем на 10^{-3} .

Полученные отсчеты Котельникова пересчитываются в распределение токов по следующей формуле, которая использована в работе [8]:

$$I'_q = \sum_{p=-\frac{M-1}{2}}^{+\frac{M-1}{2}} N(p) \exp \left[i\pi p \left(1 - \frac{1}{M} - \frac{2q}{M} \right) \right]. \quad (12)$$

Далее по полученному распределению комплексных амплитуд токов вычисляются распределения фазовых сдвигов по очевидной формуле:

$$\varphi'_q = \frac{180}{\pi} \arg(I'_q). \quad (13)$$

Расчет по формулам (12) и (13) представлен на рис. 2, a и b соответственно при $\alpha = -30^\circ$ и $\beta = 20^\circ$ и $\alpha = -30^\circ$ и $\beta = -20^\circ$.

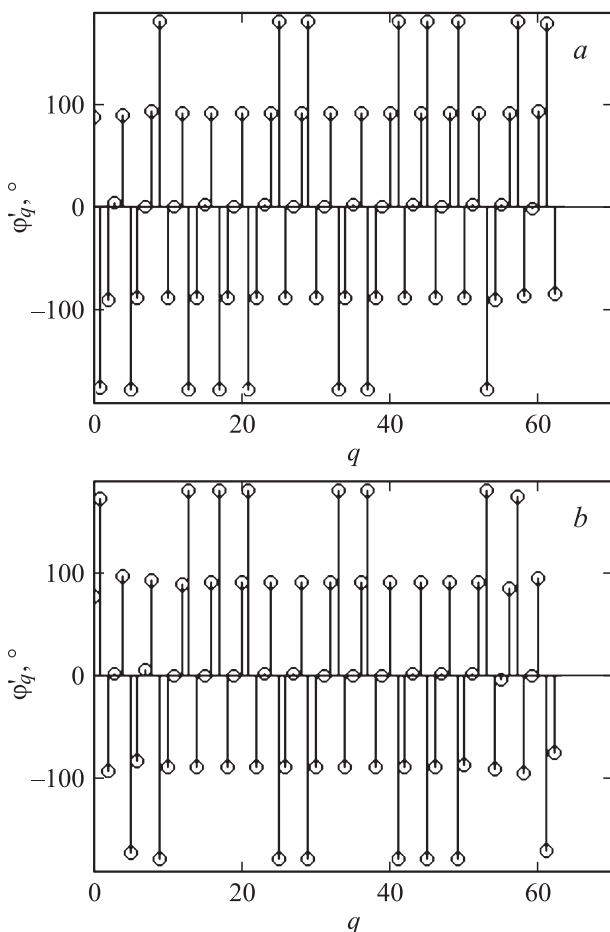


Рис. 2. Распределения фаз токов, полученные при синтезе.

Пусть наклоненный фазовый фронт исходной диаграммы направленности без провала определяется следующей формулой:

$$\varphi_q = -\frac{180}{\pi}(q+1) \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right) \sin \left(\left(\frac{\pi}{180} \right) \alpha \right). \quad (14)$$

Теперь вычислим, насколько необходимо скорректировать распределение фаз для получения провала на диаграмме направленности. Составим разность фаз, заданных формулами (13) и (14),

$$\Delta\varphi_q = (\varphi_q - \varphi'_q). \quad (15)$$

Распределение амплитуд токов, необходимое для получения провала на диаграмме направленности, определяется формулой (12). Вычислим, насколько отличается распределение амплитуд токов (12) по сравнению с исходным распределением (1).

$$K(q)_{\partial B} = 20 \log (|I'_q|/I_q). \quad (16)$$

Результаты вычисления по формулам (15) и (16) для заданных параметров диаграммы направленности представлены на рис. 3, a и b соответственно при $\alpha = -30^\circ$ и $\beta = 20^\circ$ и $\alpha = -30^\circ$ и $\beta = -20^\circ$.

3. Построение диаграмм направленности по полученному распределению комплексных токов

Когда найдено распределение комплексных токов, то результирующая диаграмма направленности вычисляется по известной формуле:

$$F^{(1)}(\theta) = \sum_{q=0}^{M-1} I'_q e^{i(kdq \sin(\theta))}. \quad (17)$$

Данная формула учитывает как фазы, так и амплитуды комплексных токов.

Диаграммы направленности, вычисленные по формуле (17), представлены на рис. 4, a и b соответственно при $\alpha = -30^\circ$ и $\beta = -20^\circ$ и $\alpha = -30^\circ$ и $\beta = -20^\circ$.

Описанный способ управления диаграммой направленности решетки излучателей имеет важное достоинство: положение главного луча и положение провала не зависят и не связаны между собой. Для того чтобы положение главного луча и положение провала были действительно не зависимы, нужно исключить или, по крайней мере, существенно уменьшить взаимное влияние соседних излучающих элементов. Существуют разработанные методы компенсации взаимного влияния с помощью введения в схему питания излучателей матрицы взаимной связи MCM (Mutual Coupling Matrix) [7]. В этой книге приведены ссылки на способы реализации MCM. Кроме этого, следует обратить внимание

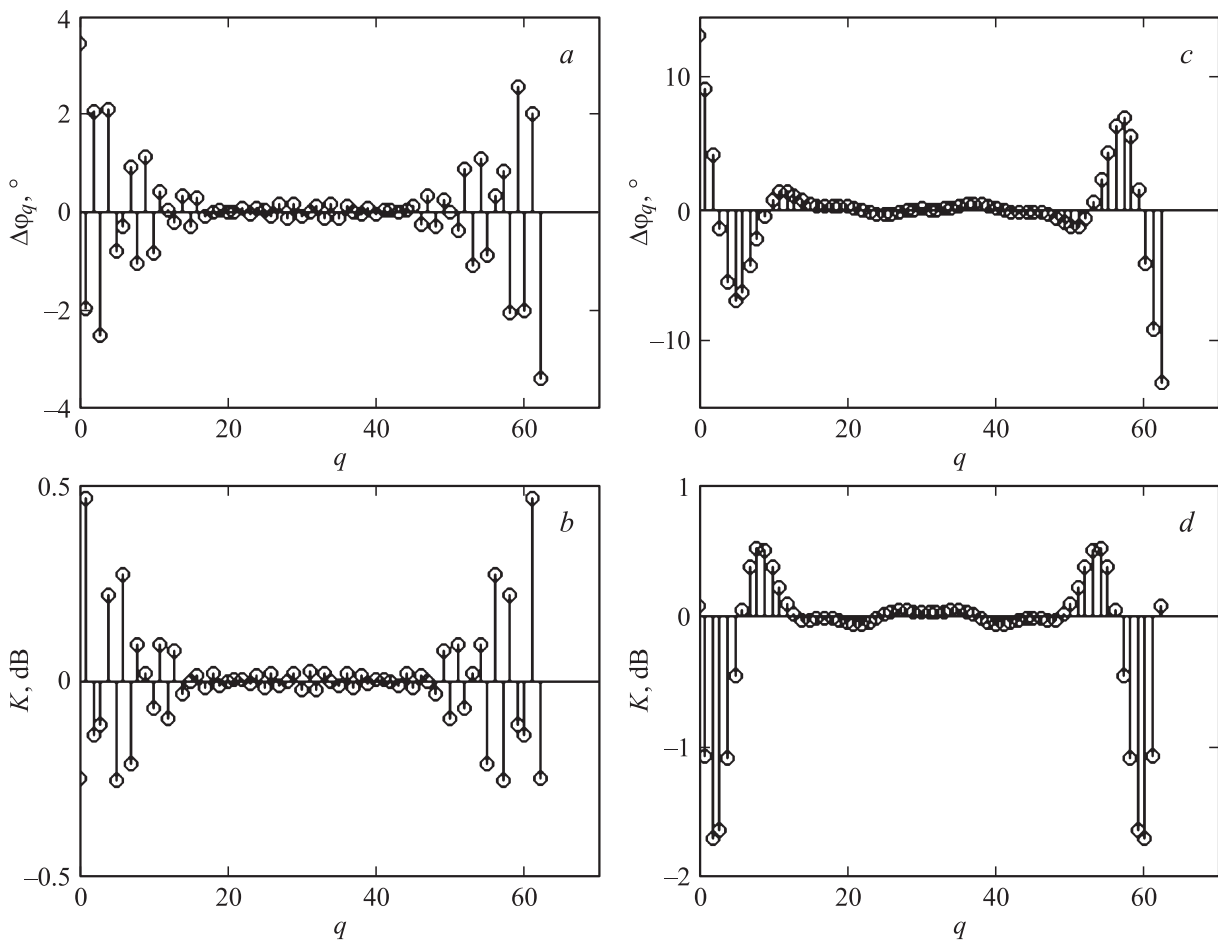


Рис. 3. Разность фаз токов и отношение амплитуд токов относительно наклоненного фазового фронта и исходного распределения амплитуд токов.

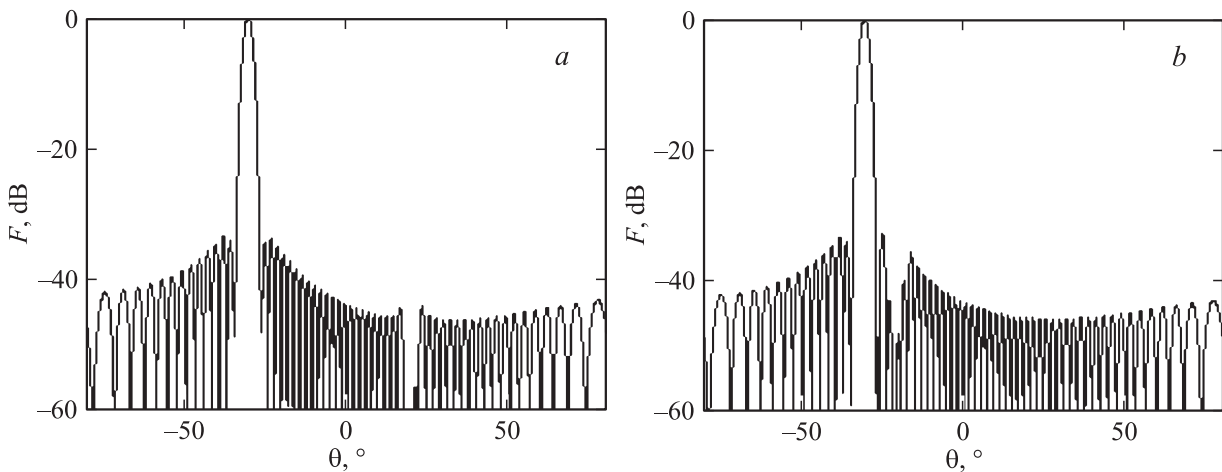


Рис. 4. Диаграммы направленности ФАР.

на включение в конструкцию ФАР элементов, образованных на основе метаматериалов [12], что позволяет подавить взаимное влияние соседних излучающих элементов.

Рассмотрим, что будет, если управлять только фазами токов в излучателях и не корректировать исходное распределение амплитуд токов, заданное в разделителе каналов. В этом случае диаграмма направленности будет

вычисляться по следующей формуле:

$$F^{(2)}(\theta) = \sum_{q=0}^{M-1} I_q e^{i \arg(I'_q)} e^{i(kdq \sin(\theta))}. \quad (18)$$

Данная формула учитывает только фазы комплексных токов, а в качестве амплитуд токов используется начальное распределение токов, заданное в разделителе каналов.

4. Заключение

Итак, мы рассмотрели важную задачу радиофизики: нахождение амплитудно-фазового распределения токов в излучателях, при котором осуществляется независимое управление главным лучом антенны и провалом в диаграмме направленности антенны, в котором резко снижено усиление антенны. Решение этой задачи важно с точки зрения практического приложения, так как позволяет подавить источник организованной помехи. В сущности, мы управляем законом интерференции волн, излученных системой излучателей. Формирование главного луча и введение в диаграмму направленности провала осуществляется с использованием синтеза комплексных амплитуд токов в излучателях. Также стоит отметить что, процедура синтеза предполагает довольно большие вычисления и занимает достаточное количество времени. Чтобы сократить продолжительность процедуры подготовки системы к формированию требуемой формы диаграммы направленности, соответствующие распределения амплитуд и фаз токов в излучателях должны быть посчитаны заранее и сохранены в памяти соответствующих блоков управления фазированной антенной решеткой.

Настоящая работа выполнена по инициативе и поддержке компании ООО „Резонанс“. antennas.spb.ru

Список литературы

- [1] Пистолькорс А.А., Литвинов О.С. Введение в теорию адаптивных антенн. М.: Наука, 1991.
- [2] Appelbaum S.P. // IEEE Trans. on AP. 1996. Vol. AP-24. N 5. P. 585–598.
- [3] Monzingo R.A., Miller T.W. Adaptive Arrays. John Wiley and Sons, New York, 1980.
- [4] Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. Boston, London Artech House, 1994.
- [5] Chu Y., Fang W.H. // IEEE Trans. on AP. 1999. Vol. AP-47. N 9. P. 1485–1494.
- [6] Mouhamadou M., Vaudon P. // Progress in Electromagnetics Research, PIER, 2006. Vol. 60. P. 95–106.
- [7] Баланис К.А., Ионидес П.И. Введение в смарт антенны. Пер. с англ. / Под ред. В.В. Попова и М.Д. Парнеса. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2012.
- [8] Vendik O.G., Kozlov D.S. // IEEE. 2012. Vol. 11. P. 648–650.
- [9] Woodward P.M., Lawson J.D. // Proc. IRE. Vol. 95. Pt 3. P. 362–370.
- [10] Вендик О.Г. // Изв. вузов. Радиотехника. 1960. Т. 3. Вып. 1. С. 77–81.
- [11] Mukhopadhyay M., Sarkar B.K., Chakraborty A. // Progress in Electromagnetics Research, PIER. 2007. Vol. 67. P. 231–249.
- [12] Вендик И.Б., Вендик О.Г. // ЖТФ. 2003. Т. 83. Вып. 1. С. 3–28.