

М. И. Сугак, Ю. И. Шарапкина

ФГБОУ ВПО Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Характеристики широкополосных вибраторных ФАР с малым междуэлементным расстоянием

В докладе представлены результаты анализа характеристик широкополосных ФАР, выполненных на основе ленточных вибраторов над проводящим экраном, в которых для обеспечения широкой полосы рабочих частот междуэлементное расстояние берется малым ($0,1-0,3$ длины волны). Математическая модель для бесконечной ФАР основана на результатах работы [1], анализ характеристик конечных ФАР выполнен методом конечного интегрирования.

Ключевые слова: широкополосные ФАР, вибраторные элементы, добротность.

Представлены результаты теоретического исследования характеристик вибраторных фазированных антенных решеток над проводящим экраном, в которых для обеспечения широкой полосы рабочих частот реализованы малые межэлементные расстояния. Исследованы два варианта геометрии расположения элементов: дискретное (рис.1а) и непрерывное (соединенное) расположение в Е-плоскости (рис. 1б) [2].

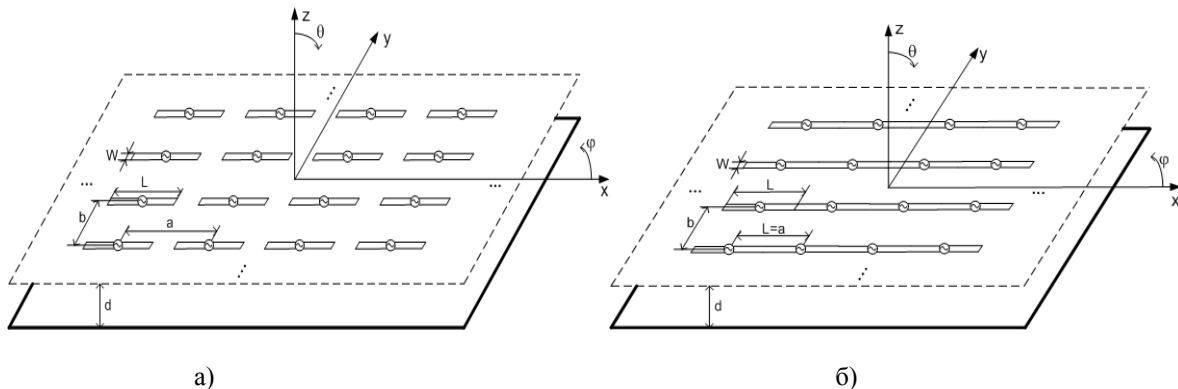


Рис. 1

Математическая модель АР основана на данных работы [1]. Ток на каждом вибраторе представляется в виде суммы N базисных функций треугольного вида с неизвестными базисными коэффициентами (рис. 2а, б).

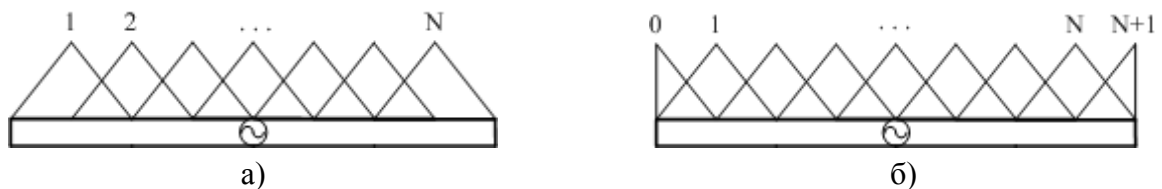


Рис. 2

В поперечном направлении (вдоль оси y на рис.1) распределение тока принято равномерным. На основании процедуры Галеркина задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных амплитуд тока:

$$U = Z \cdot I$$

Взаимные сопротивления между сегментами вибраторов, вычисляются по формуле:

$$Z_{ij} = \frac{jZ_0}{k_0 ab} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} Q(k_x, k_y) F_i^*(k_x, k_y) F_j(k_x, k_y), \quad (1)$$

где $Q(k_x, k_y)$ - Фурье-образ функции Грина:

$$Q(k_x, k_y) = \frac{(k_0^2 - k_x^2) \sin(k_1(k_x, k_y) \cdot d)}{k_1(k_x, k_y)} e^{-i \cdot k_1(k_x, k_y) \cdot d}, \quad (2)$$

где $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ - волновое число свободного пространства,

$$k_1(k_x, k_y) = -i \sqrt{-k_0^2 + k_x^2 + k_y^2},$$

$$k_x = \frac{2\pi}{a} m + k_0 \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi,$$

$$k_y = \frac{2\pi}{b} n + k_0 \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi,$$

$F_i(k_x, k_y)$ - преобразование Фурье от распределения тока на i -ом сегменте ($i=1, 2..N$):

$$F_i(k_x, k_y) = \text{sinc}\left(k_y \cdot \frac{W}{2}\right) \cdot \frac{L}{N+1} \text{sinc}\left[\frac{L \cdot k_x}{2(N+1)}\right]^2 \cdot e^{i \cdot k_x \frac{L}{N+1} \left(\frac{N+1}{2} - i\right)}, \quad (3)$$

$F_i^*(k_x, k_y)$ - функция, комплексно сопряженная по отношению к $F_i(k_x, k_y)$,

$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(x)}{x}$. Для случая АР, состоящей из соединенных в Е-плоскости вибраторных

элементов выражение для функций $F_i(k_x, k_y)$ принимает вид:

$$F_i(k_x, k_y) = \begin{cases} \text{sinc}\left(k_y \cdot \frac{W}{2}\right) \cdot \frac{(N+1) \cdot (1 - e^{-i \cdot k_x \frac{L}{N+1}}) - i \cdot k_x L}{k_x^2 \cdot L} e^{i \cdot k_x \frac{L}{2}}, & i = 0 \\ \text{sinc}\left(k_y \cdot \frac{W}{2}\right) \cdot \frac{L}{N+1} \text{sinc}\left[\frac{L \cdot k_x}{2(N+1)}\right]^2 \cdot e^{i \cdot k_x \frac{L}{N+1} \left(\frac{N+1}{2} - i\right)}, & i = 1, 2..N \\ \text{sinc}\left(k_y \cdot \frac{W}{2}\right) \cdot \frac{(N+1) \cdot (1 - e^{-i \cdot k_x \frac{L}{N+1}}) + i \cdot k_x L}{k_x^2 \cdot L} e^{-i \cdot k_x \frac{L}{2}}, & i = N+1 \end{cases} \quad (4)$$

Вектор амплитуд тока находится через матрицу взаимных импедансов:

$$I = Z^{-1} \cdot U, \quad (5)$$

где U – вектор-столбец напряжений, элементы которого равны нулю, за исключением центрального, равного 1 В, соответствующего включению генератора в центр вибраторного излучателя. Из формулы (5) вычисляется входной импеданс $Z_{in}(\omega) = R_{in}(\omega) + i \cdot X_{in}(\omega)$ и добротность:

$$Q(\omega) \approx \frac{\omega}{2R_{in}(\omega)} \sqrt{\left(\frac{\partial R_{in}(\omega)}{\partial \omega}\right)^2 + \left(\frac{\partial X_{in}(\omega)}{\partial \omega} + \frac{|X_{in}(\omega)|}{\omega}\right)^2} \quad (6)$$

На рисунке 3а приведена зависимость поведения добротности излучателя в составе бесконечной ФАР (геометрия решетки: $L=0,5\lambda$, $a=0,6\lambda$ и $W=0,002\lambda$) при изменении периода вдоль оси y (см. рис. 1а) для разных значений высоты над экраном (исследование проводилось в синфазном режиме).

На рисунке 3б представлена зависимость добротности элемента ФАР с квадратной сеткой расположения излучателей ($L=a=b$) из соединенных в Е-плоскости диполей от их геометрических размеров для разных значений высоты над экраном. Здесь обращает на себя внимание тот факт, что полученные значения добротности заметно ниже, чем при обычном, т.е. «дискретном» построении ФАР, что может представлять практический интерес при реализации широкополосных антенных решеток.

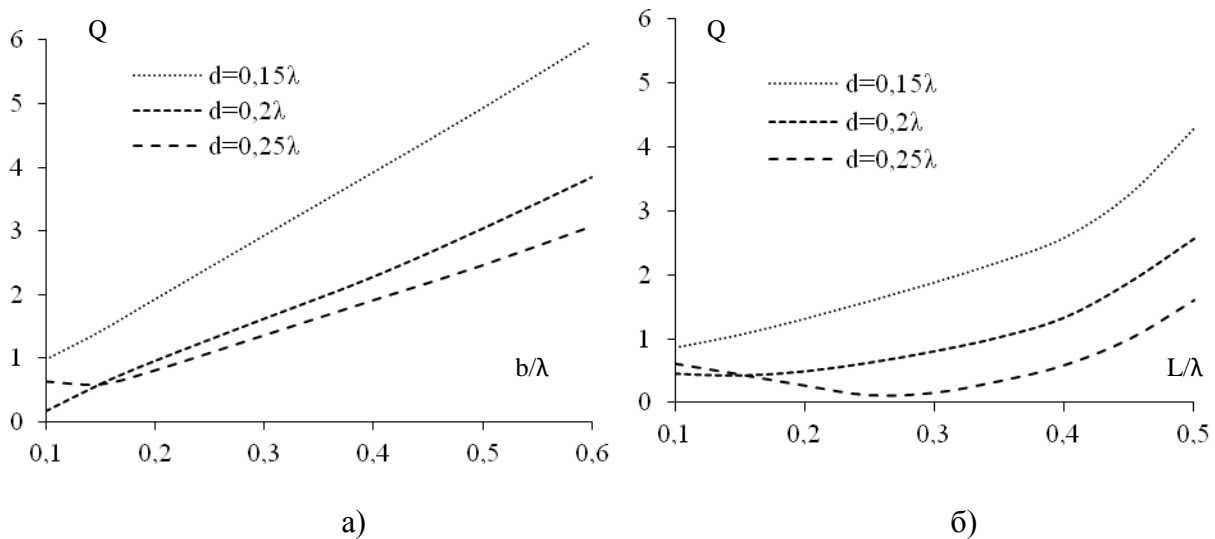


Рис. 3

Из полученных графиков следует, что усиление взаимного влияния элементов в ФАР привело к существенному снижению добротности [3], причем убывание добротности с уменьшением межэлементного расстояния в Н-плоскости носит практически линейный характер для расстояний до экрана $(0,1-0,2)\lambda$. Использование электрически коротких вибраторов в качестве элементов ФАР также существенно уменьшает добротность, т.е. увеличивает рабочий диапазон частот, причем в случае ФАР, состоящей из соединенных вибраторов, полоса оказывается больше, чем в дискретной ФАР плотно упакованной в Н-

плоскости (на рис. 4 представлены частотные зависимости коэффициента отражения излучателя в составе ФАР при $d=0,2\lambda$).

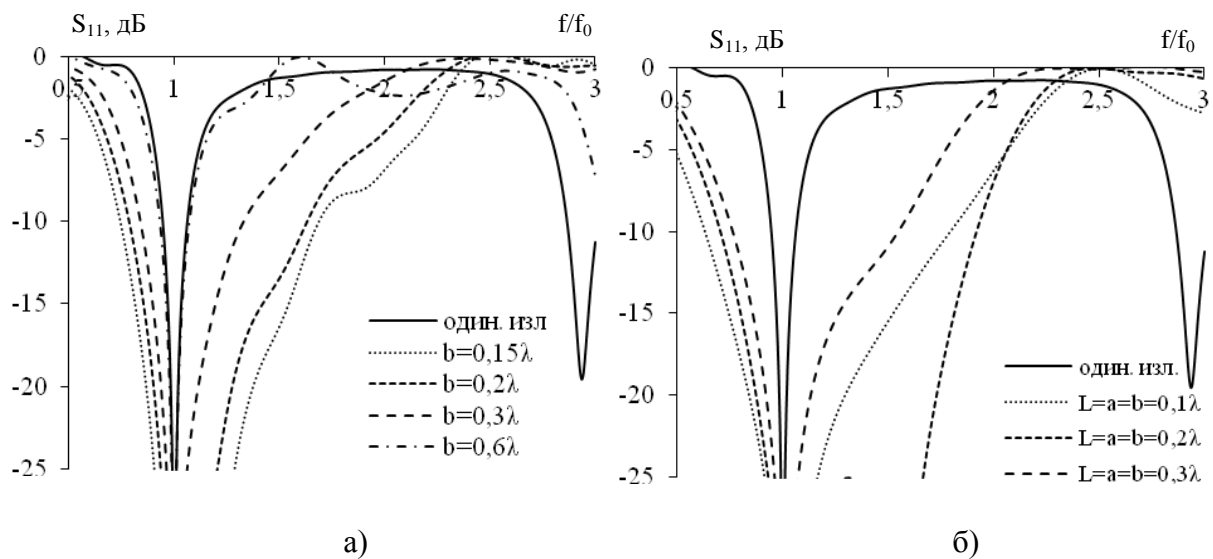


Рис. 4

Результаты исследования частотной зависимости коэффициентов отражения излучателей конечной ФАР, состоящей из плотно упакованных в Н-плоскости элементов (геометрия решетки: $N_x=5$, $N_y=9$, $L=0,5\lambda$, $a=0,6\lambda$, $b=0,2\lambda$, $W=0,002\lambda$, $d=0,2\lambda$), в синфазном режиме приведены на рисунке 5а. Зависимость коэффициентов отражения центральных и периферийных (угловых) излучателей в синфазном режиме (рис. 5б) для случая ФАР, состоящей из соединенных в Е-плоскости элементов (геометрия решетки: $N_x=N_y=14$, $L=a=b=0,2\lambda$, $W=0,002\lambda$, $d=0,2\lambda$) показана на рисунке 5б.

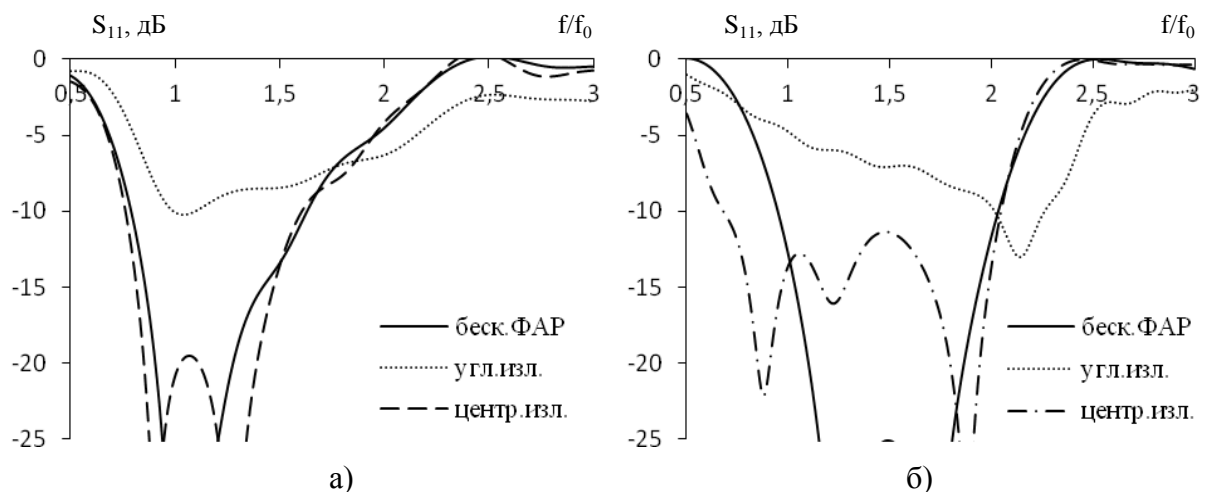


Рис. 5

Таким образом, в ФАР, построенных по такому принципу удается получить полосу рабочих частот с перекрытием 1.5-2.0, при этом существенно возрастает число приемопередающих модулей.

Библиографический список

1. D. M. Pozar, D. H. Schaubert. Scan Blindness in Infinite Phased Arrays of Printed Dipoles. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, No. 6, June 1984, p.602-610.
2. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. Второе издание. М.: Техносфера, 2012. -560 с.
3. Сугак М.И., Шарапкина Ю.И. Оценка добротности вибраторного излучателя в составе конечной ФАР. Сборник докладов научно-технической школы-семинара «Инфокоммуникационные технологии в цифровом мире». Санкт-Петербург 2012, с. 48-49.