

УДК 621.396.677

Л. М. Любина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Расширение полосы рабочих частот вибраторной фазированной антенной решетки с помощью пассивных планарных элементов¹

Приведены результаты электродинамического моделирования бесконечной вибраторной фазированной антенной решетки (ФАР) с пассивными планарными элементами, размещенными над проводящей плоскостью. Представлены частотные зависимости коэффициентов отражения в трактах питания элементов и динамические характеристики коэффициента усиления для конечных ФАР, построенных на основе бесконечной модели. Рассмотрены перспективные с точки зрения расширения полосы рабочих частот варианты геометрии ФАР.

Бесконечная фазированная антенная решетка, полоса рабочих частот, добротность, ячейка Флоке

При проектировании современных фазированных антенных решеток (ФАР) представляет большой интерес исследование структур с малым межэлементным расстоянием, в которых добротность излучателей с учетом взаимного влияния элементов была бы низкой при обеспечении широкоугольного режима сканирования. Подобные структуры исследованы, например, в [1], [2], где найдена геометрия ряда вариантов ФАР из ленточных вибраторных излучателей над проводящим экраном, работающих в полосе частот около октавы. Возможность расширения полосы ФАР за счет межэлементных связей при уменьшении шага решетки также подтверждается в [3], [4], где анализ добротности выполнен на основе интегрирования ближних полей элементов с применением теоремы Флоке и последующим вычислением реактивной и активной энергии [5].

Исследуемая в [1]–[4] геометрия ФАР, перспективная с точки зрения построения широкополосных антенн, предполагает существенное усложнение системы питания. Один из возможных путей упрощения диаграммообразующей схемы (ДОС) при проектировании ФАР заключается в уменьшении количества активных излучателей за счет ввода в структуру пассивных элементов для усиления межэлементных связей. Это позволит снизить необходимое число фазовращателей, стоимость которых в настоящее время составляет до 90 % от всей стоимости ФАР [6].

В настоящей статье методом электродинамического моделирования исследуются характеристики бесконечной однослойной вибраторной ФАР над проводящим экраном, состоящей из комбинации активных и пассивных элементов. Целью исследования является поиск оптимальной геометрии ФАР, в которой за счет применения пассивных элементов удастся реализовать широкую полосу рабочих частот при некотором уменьшении числа фазовращателей.

Исследуемая ФАР представлена на рис. 1, а. Вибраторы 1 расположены с шагом $a = 0.6\lambda$ (λ – длина волны излучения) в E -плоскости и шагом b в H -плоскости, изменяемым в процессе моделирования. Вибраторы расположены на расстоянии d от проводящей поверхности 3 и запитаны в своих центрах от источников 2. Элементарный активный диполь ФАР (1 – рис. 1, б) длиной $L = 0.5\lambda$ и шириной $W = 0.005\lambda$ расположен на расстоянии d от проводящей поверхности (3 – рис. 1, а). В структуру диполя дополнительно введены расположенные в его плоскости планарные пассивные элементы с размерами $2L_p = 0.21\lambda$, $2W_p = b - 0.05\lambda$ и расстоянием между ними в H -плоскости $Z_p = 0.05\lambda$, выбранными с точки зрения минимизации добротности при указанных шаге диполей в составе ФАР в E -плоскости и длине активного диполя.

Электродинамический анализ выполнялся численно методом конечного интегрирования, добротность рассчитывалась из частотной зависимости входного импеданса излучателя по известной

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере.

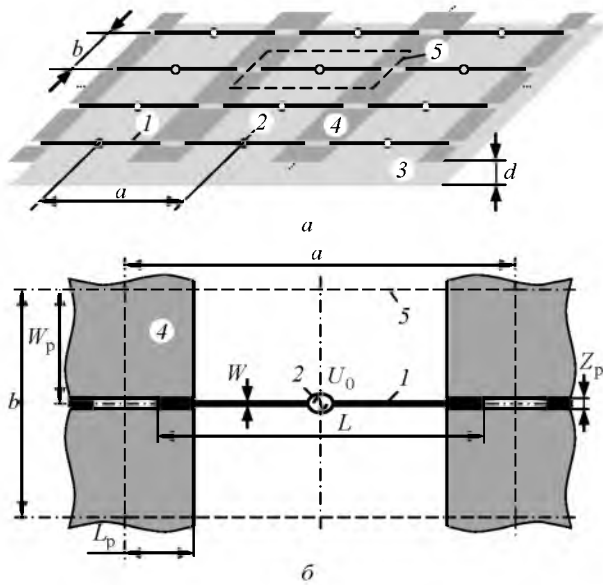


Рис. 1

методике [7]. Размеры ячейки Флоке (5 – рис. 1, a и b) составляли $a \times b$. Зависимости для бесконечной плотноупакованной вибраторной ФАР без пассивных элементов представлены далее серыми кривыми, с пассивными элементами – черными.

На рис. 2 представлена рассчитанная зависимость добротности элементарного диполя в составе бесконечной ФАР с пассивными элементами от шага решетки b в H -плоскости в сравнении с результатами для плотноупакованной вибраторной ФАР без пассивных элементов [1], [2]. Минимум добротности для ФАР с пассивными элементами с $d = 0.2\lambda$ наблюдается при $b = 0.35\lambda$, с $d = 0.15\lambda$ – при $b = 0.275\lambda$, причем эти значения превышают позиции, соответствующие минимумам Q для ФАР без пассивных элементов, при тех же значениях d . Таким образом, использование пассивных элементов в составе ФАР позволяет достичь рабочей полосы частот, сравнимой с полосой плотноупакованной ФАР, при большем шаге решетки в H -плоскости.

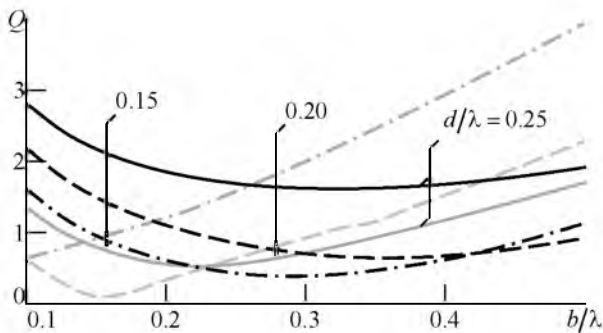


Рис. 2

Анализ эффектов сканирования луча в E - и H -плоскостях для бесконечных ФАР показывает, что введение в излучающий раскрыв пассивных элементов позволяет несколько улучшить динамические характеристики по сравнению с результатами, рассмотренными в [1], [2]. Из зависимостей $Q(\theta)$ (рис. 3) следует, что для $d = 0.15\lambda$ и 0.2λ при углах сканирования в H -плоскости $0 \dots 60^\circ$ от нормали, а в E -плоскости $0 \dots 40^\circ$ от нормали ФАР с пассивными элементами обладают меньшими значениями добротности по сравнению с ФАР без пассивных элементов. Это свидетельствует о возможности построения широкополосных бесконечных плотноупакованных вибраторных ФАР [2] при больших размерах ячейки Флоке в H -плоскости и, как следствие, при меньшем количестве необходимых для построения антенны активных элементов.

Для сравнения характеристик антенны предложенной геометрии с известными решениями [1], [2] по широкополосности и выигрышу в количестве фазовращателей зафиксируем площадь излучающего раскрыва ФАР и ряд конструктивных параметров. Представленные далее результаты получены при постоянных значениях $W = 0.005\lambda$, $a = 0.6\lambda$, $d = 0.15\lambda$, $L = 0.5\lambda$, $2L_p = 0.21\lambda$, $Z_p = 0.05\lambda$. Изменяемые параметры сведены в таблицу, где m, n – число элементов конечных ФАР в H - и E -плоскостях соответственно. Так как в известных ФАР шаг расположения излучателей ограничен снизу значением, несколько превышающим 0.5λ и сверху – значением, при котором в

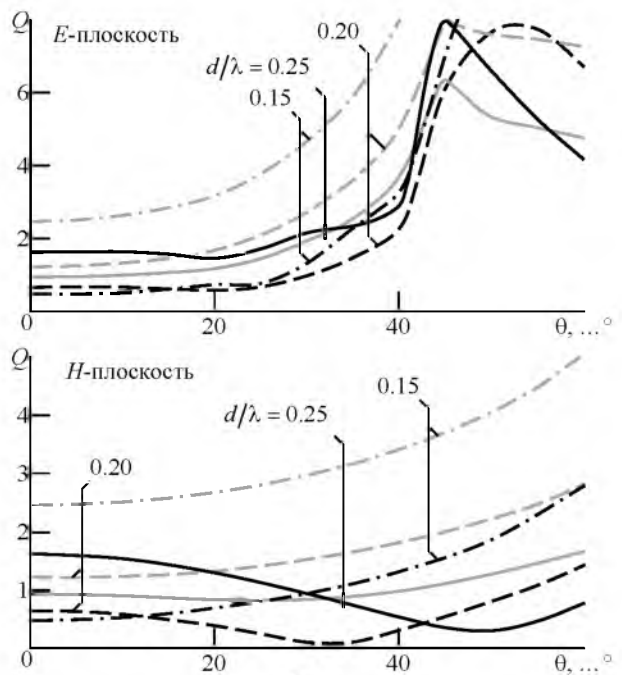


Рис. 3

$2W_p/\lambda$	b/λ	f_B/f_H	$m \times n$	$mn/(m_0n_0)$
–	0.60	1.070	10 × 10	1
0.40	0.45	1.761	13 × 10	1.3
0.25	0.30	2.185	20 × 10	2
0.15	0.20	2.257	30 × 10	3
–	0.15	1.948	40 × 10	4
–	0.30	1.745	20 × 10	2

диаграмме направленности ФАР возникают существенные дифракционные лепестки, сравнение предлагаемых антенн проводилось с базовой ФАР, для которой $b = 0.6\lambda$ и число элементов $m_0 = n_0 = 10$. Параметры указанной ФАР в таблице выделены жирным шрифтом.

Анализ характеристик для конечных ФАР выполнялся на основе результатов расчета бесконечной модели с использованием стандартной методики [8]. На основании данных численного моделирования, представленных на рис. 4, 5, проведена оценка коэффициента перекрытия исследуемых вариантов антенн по частоте f_B/f_H , где f_B и f_H – верхняя и нижняя границы диапазона соответственно. Определение значения f_B/f_H выполнено по уровню $|S_{11}| = -10$ дБ (рис. 4). Согласно рис. 5 в пределах полосы рабочих частот рассматриваемых конечных ФАР (таблица и рис. 4) коэффициент усиления (КУ) антенн в синфазном режиме различается не более чем на 2 дБ. Такие потери можно считать приемлемыми, учитывая возможность сокращения за их счет числа актив-

ных излучателей в составе ФАР при полосе рабочих частот, сравнимой с октавой.

Отметим, что полученные данные согласуются с предварительной оценкой широкополосности, выполненной на основании рис. 2 для $d = 0.15\lambda$. Ранее было сделано предположение о возможном расширении полосы рабочих частот антенны для $b \geq 0.16\lambda$. Несмотря на отмеченный минимум в точке $b = 0.275\lambda$, исходя из рис. 4, 5 можно сделать вывод, что наибольшей полосой ($f_B/f_H = 2.257$) обладает ФАР с пассивными элементами при $b = 0.2\lambda$ и $m \times n = 30 \times 10$.

Основные результаты моделирования конечных ФАР представлены в таблице, из которой следует, что введение в геометрию вибраторной ФАР пассивных элементов является одним из возможных способов расширения полосы рабочих частот. При этом возможно увеличение шага решетки в H -плоскости по сравнению с решениями [1], [2]. Например, заменив плотноупакованную ФАР с $m \times n = 40 \times 10$ и полосой $1.948 f_B/f_H$, полученную по материалам [1], ФАР с пассивными элементами с $m \times n = 30 \times 10$ и полосой $2.257 f_B/f_H$, можно сократить количество активных элементов на 25 %.

Кроме того, при использовании пассивных элементов в ФАР удается достичь полосы рабочих частот, сравнимой с полученной для плотноупакованной вибраторной ФАР. При этом для ФАР с пассивными элементами шаг решетки в

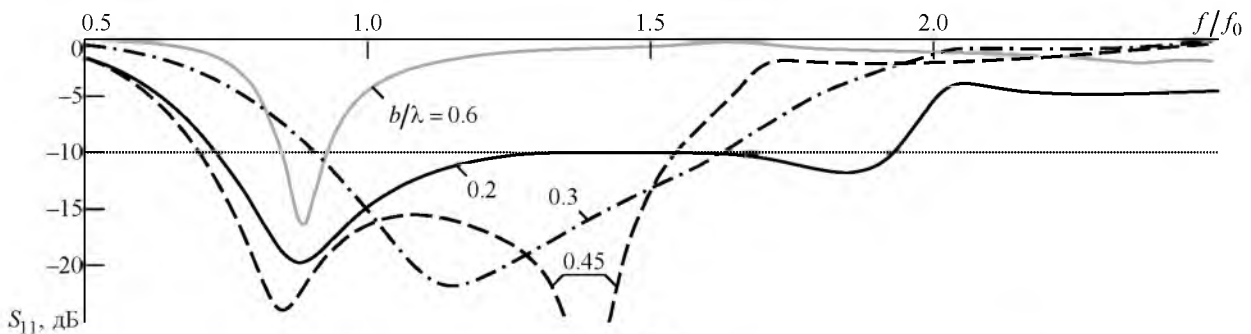


Рис. 4

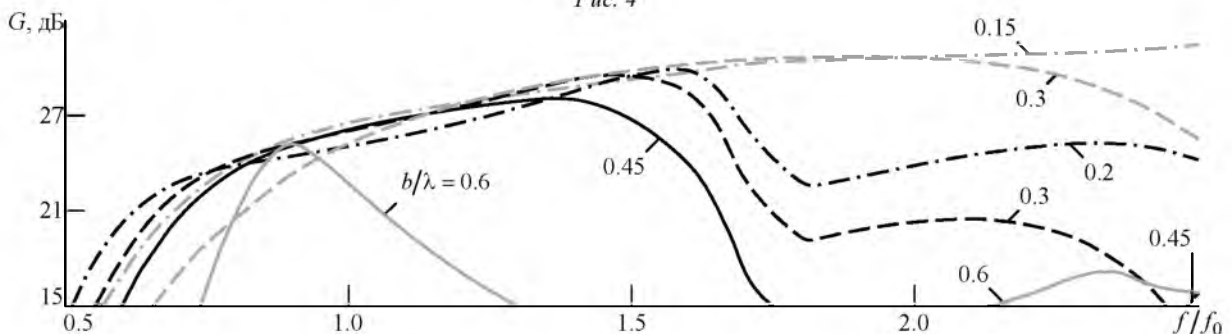


Рис. 5

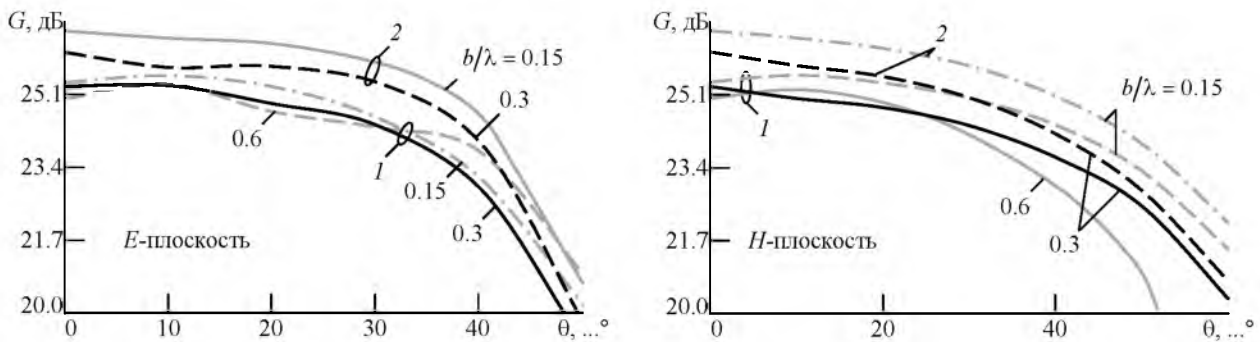


Рис. 6

H -плоскости будет больше, чем в обычной ФАР. Например, используя вместо плотноупакованной ФАР с размерами $m \times n = 20 \times 10$ ФАР с пассивными элементами и размерами $m \times n = 13 \times 10$, можно уменьшить количество фазовращателей на 35 %.

Указанный выигрыш в широкополосности при менее плотной упаковке в H -плоскости сказывается на динамических характеристиках ФАР. На рис. 6 представлены зависимости КУ от угла сканирования в E - и H -плоскостях для следующих геометрий: вибраторная ФАР с $b = 0.6\lambda$ и $m_0 = n_0 = 10$, вибраторная ФАР с $b = 0.15\lambda$ и $m \times n = 40 \times 10$, ФАР с пассивными элементами с $b = 0.3\lambda$ и $m \times n = 20 \times 10$ (см. таблицу). Сравнение результатов проведено как в пределах полосы рабочих частот базовой ФАР, так и вне ее.

Как видно из рис. 6, в пределах полосы рабочих частот базовой ФАР (кривые 1) в E -плоскости проигрыш по КУ антенны с пассивными элементами и $b = 0.3\lambda$ относительно базовой составляет до 1.5 дБ и относительно ФАР с $b = 0.15\lambda$ без пассивных элементов – до 0.5 дБ. В H -плоскости ФАР с пассивными элементами уже при угле сканирования 30° обладает КУ, превышающим значение для базовой ФАР, уступая плотноупакованной вибраторной ФАР $b = 0.15\lambda$ в рассматриваемом диапазоне углов до 1.16 дБ. Вне полосы рабочих частот базовой вибраторной ФАР (кривые 2)

для ФАР с пассивными элементами наблюдается уменьшения уровня КУ на 0.1...0.85 дБ в E -плоскости и 0.1...1.16 дБ в H -плоскости по сравнению с плотноупакованными ФАР.

Представленные в настоящей статье результаты электродинамического моделирования характеристик плоского дипольного излучателя в составе бесконечной ФАР показывают, что введение пассивных планарных элементов позволяет достичь широкополосности, сравнимой с плотноупакованными ФАР или превосходящей их при одновременном большем шаге решетки в H -плоскости. Однако это происходит за счет незначительного ухудшения динамических характеристик и уменьшения уровня КУ по отношению к ФАР, представленным в [1], [2].

Анализ характеристик конечных ФАР с одинаковой площадью излучающего раскрытия антенны, построенных на основе бесконечных моделей, позволил сделать вывод, что для ФАР с пассивными элементами можно достичь полосы рабочих частот порядка октавы, аналогичной ФАР из [1], [2], при меньшем количестве активных излучателей решетки (до 35 % в рассмотренных в настоящей статье случаях). Это позволяет считать рассмотренные геометрии перспективными с точки зрения построения широкополосных ФАР при более простой системе питания, чем для ФАР с малым межэлементным расстоянием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сугак М. И., Шарапкина Ю. И. Характеристики широкополосных вибраторных ФАР с малым межэлементным расстоянием // Электроника и микроэлектроника СВЧ: сб. докл. Всерос. конф., Санкт-Петербург, 3–6 июня 2013 г. // URL: <http://mwelectronics.ru/2013/stend.html> (дата обращения 02.07.2016).
2. Сугак М. И., Шарапкина Ю. И. Добротность вибраторных излучателей в составе бесконечной ФАР // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2013. № 2. С. 3–7.
3. Любина Л. М., Сугак М. И. Электродинамический анализ добротности вибраторного излучателя в

- составе многослойной ФАР // 68-я науч.-техн. конф. профес.-препод. состава ун-та: сб. докл. студентов, аспирантов и молодых ученых. Санкт-Петербург, 28 янв.–5 февр. 2015 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. С. 23–27.
4. Любина Л. М., Сугак М. И. Анализ добротности многослойного печатного излучателя в составе бесконечной ФАР // Сб. докл. Юбилейной 70-й Всерос. науч.-техн. конф., посвященной Дню радио. Санкт-Петербург, 21–29 апр. 2015 г. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2015. С. 6–9.

5. Kwon D. H., Pozar D. M. Energy Storage and Radiation Q of Infinite Planar Dipole Phased Arrays // IEEE Trans. on Ant. and Propag. 2014. Vol. AP-62, iss. 1. P. 153–162.

6. Воскресенский Д. И. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток: учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1981. 436 с.

7. Yaghjian A. D., Best S. R. Impedance, bandwidth, and Q of antenna // IEEE Trans. on Ant. and Propag. 2005. Vol. 53, iss. 4. P. 1298–1324.

8. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.

L. M. Lyubina

Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"

Expansion of Dipole Phased Array Bandwidth by Passive Planar Elements

The results of modeling of infinite dipole phased antenna array (PAA) over conducting plane with passive planar elements are presented. It shows frequency dependences of the reflection coefficients in feeders and dynamic characteristics of the gain for the finite PAA that are based on infinite model. Perspective in terms of bandwidth expanding variants of geometry are considered.

Infinite phased antenna array, bandwidth, quality factor, floquet cell

Статья поступила в редакцию 14 марта 2016 г.