

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧАЮЩЕГО РАСКРЫВА МНОГОЭЛЕМЕНТНОЙ ФАР V-ОБРАЗНЫХ ВИБРАТОРОВ

Мануилов М.Б.

ФГОУ «Южный федеральный университет»

Волошин В.А., Ларин А.Ю., Оводов О.В.

ФГУП «Ростовский НИИ радиосвязи»

В работе исследована вибраторная фазированная антенная решетка (ФАР) сантиметрового диапазона с плоским раскрытием больших электрических размеров. В качестве излучателей использованы вибраторы с плоскими наклонными плечами, размещенные на четвертьволновых стойках над проводящим экраном. Электродинамическое моделирование характеристик согласования выполнено на основе моделей бесконечной и конечной решеток вибраторов.

Различные типы вибраторных излучателей находят широкое применение в составе антенных решеток (АР), что обусловлено такими хорошо известными достоинствами вибраторов как относительно малая масса, устойчивость к атмосферным внешним воздействиям, возможность получения произвольной поляризации и обеспечение работы в достаточно широком диапазоне при секторе сканирования лучом до $\pm 45^\circ \dots 50^\circ$ [1].

Некоторые модификации вибраторных излучателей над плоским проводящим экраном рассматривались в работах [2-8]. При исследовании бесконечных АР прямых вибраторов параллельных экрану, было установлено возникновение эффекта ослепления, связанного с наличием четвертьволновых стоек, поддерживающих излучатели над экраном [2,3]. Для предотвращения этого эффекта были использованы конструкции вибраторов, в которых плечи наклонены в направлении экрана на 45° [5-7]. Такая модификация вибратора получила название инвертированного V-образного вибратора.

Наряду с изменением характеристик направленности V-образного вибратора, изменяются и его характеристики согласования, которые для одиночного излучателя были более детально исследованы в [7]. На входное сопротивление излучателя оказывает влияние величина взаимодействия между плечами вибратора, между плечами и линией питания (стойками), между плечами и экраном. В [7] показана возможность некоторого улучшения диапазонных свойств одиночного V-образного вибратора при увеличении высоты четвертьволновых стоек до $0.3\lambda \dots 0.35\lambda$.

Целью данной работы является поиск оптимальной конструкции излучателя и параметров излучающего раскрытия многоэлементной фазированной антенной решетки сантиметрового диапазона.

При выборе типа излучателя и определении параметров сетки размещения излучателей в антенной решетке необходимо обеспечить выполнение комплекса спецификаций, который включает следующие основные требования. Относительная ширина рабочего диапазона ФАР должна быть не менее 6%. Решетка должна иметь плоский раскрытие с электрическими размерами порядка нескольких десятков длин волн и числом излучателей несколько тысяч. С конструктивной точки зрения предпочтительна прямоугольная сетка расположения излучателей, что необходимо для объединения излучателей в модули. Поляризация излучателя линейная горизонтальная, параллельная максимальному размеру

раскрыва ФАР. Ширина сектора углов электронного сканирования должна составлять не менее $\pm 45^\circ$ относительно нормали к раскрыву АР в горизонтальной плоскости и $\pm 60^\circ$ – в вертикальной плоскости.

При возбуждении излучателя стандартной 50-омной коаксиальной линией расчетное значение «активного» КСВ в заданных секторах электронного сканирования не должно превышать 1.4. Реально достижимое значение КСВ уточняется по результатам исследований. Одним из ключевых требований также является обеспечение минимальных габаритов и веса излучателя. Конструкция излучателя должна быть максимально простой и обеспечивающей высокую идентичность излучателей при их производстве, а также должна иметь высокую механическую прочность.

Исходя из перечисленных требований к излучающему полотну ФАР, в процессе поиска технического решения был рассмотрен ряд конструкций вибраторных излучателей над идеально проводящим экраном. В качестве возможных вариантов реализации излучателей для ФАР в данной работе были исследованы различные конструкции вибраторов с плечами в виде пластин трапецевидной формы, излучатель близкий по форме к логопериодическому, несколько конструкций V-образных излучателей. Перечисленные конструкции обеспечивают в целом приемлемые электрические характеристики. Однако с учетом требований к технологичности конструкции, повторяемости характеристик, устойчивости к вибрациям в качестве итогового варианта был выбран излучатель с наклонными плечами (рис.1).

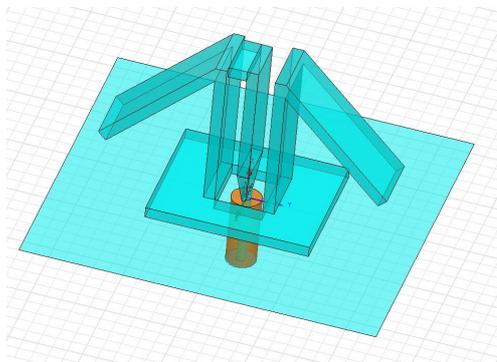


Рис. 1. V-образный вибратор в составе бесконечной антенной решетки (модель для метода конечных элементов).

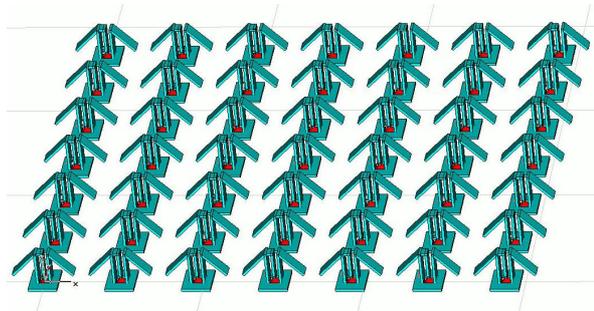


Рис. 2. Конечная решетка 7×7 вибраторных излучателей (модель для метода конечного интегрирования).

Изображенный на рис. 1 инвертированный V-образный вибратор не содержит отдельных частей и изготавливается путем фрезерования, что обеспечивает необходимую жесткость конструкции и высокую повторяемость характеристик. Использование вибратора с плоскими плечами несколько улучшает его диапазонные свойства, вибраторы такого типа обладают также повышенной электрической прочностью [1]. Плечи вибратора наклонены под углом 45° по направлению к экрану, что позволяет уменьшить взаимную связь излучателей в решетке, а также сократить максимальный размер излучателя до приемлемого значения с учетом требований к периоду решетки. Вибратор возбуждается

стандартной 50-омной коаксиальной линией, оплетка которой соединена с проводящим экраном, а центральный проводник – с центральным проводником воздушной полосковой линии, внешние проводники которой одновременно выполняют функцию несущих стоек вибратора на рис. 1.

Поиск оптимальных параметров излучающего раскрыва ФАР включал на первом этапе электродинамическое моделирование одиночного излучателя, а затем – исследование различных моделей АР (рис. 1, 2). Расчеты проводились методом конечного интегрирования [9,10] и методом конечных элементов [11], эффективность которых при анализе данного класса трехмерных излучающих структур хорошо известна. Поскольку раскрыв исследуемой ФАР включает несколько тысяч излучателей, наиболее физически адекватной для такой решетки является модель бесконечной периодической АР вибраторных излучателей, основанная на применении теоремы Флоке. Наиболее эффективное решение данного класса электродинамических задач для бесконечных решеток излучателей со сложной геометрией может быть получено на основе метода конечных элементов [11].

Процедура выбора оптимальных размеров вибраторного излучателя состоит из двух этапов. На первом этапе оптимизируются размеры плоских проводников полосковой четвертьволновой линии передачи, установленной на плоском бесконечном экране. Вместо плеч вибратора угловые точки внутреннего и двух внешних проводников линии передачи соединены четырьмя точечными резисторами номиналом 200 Ом, обеспечивающими результирующую нагрузку 50 Ом. Путем подбора ширины внутреннего проводника и зазоров между проводниками линии передачи достигается входное сопротивление $50 \pm 0,5$ Ом в заданном частотном диапазоне. На втором этапе оптимизируется длина плеч вибратора и проверяется возможность улучшения КСВ за счет коррекции в небольших пределах ширины внутреннего проводника и длины полосковой линии передач

В результате электродинамического моделирования была получена конструкция вибратора (рис. 1), который имеет следующие электрические размеры: длина плеч $0.228\lambda_0$, высота стоек $0.248\lambda_0$, ширина стоек и плеч $0.088\lambda_0$, ширина центрального проводника полосковой линии $0.069\lambda_0$, толщина всех элементов $0.017\lambda_0$, ширина воздушного зазора между центральным и внешними проводниками полосковой линии $0.028\lambda_0$, где λ_0 – длина волны на центральной частоте рабочего диапазона. Расчетные результаты, полученные двумя электродинамическими методами для КСВ одиночного излучателя (рис. 3), весьма близки между собой и хорошо согласуются с экспериментом.

На рис. 4 приведено сравнение теоретических и экспериментальных результатов для 8-элементной линейной Е-плоскостной АР вибраторов при возбуждении четвертого излучателя (остальные излучатели нагружены на согласованные нагрузки). Рабочему диапазону ФАР соответствует интервал частотного параметра $0.97 \leq f/f_0 \leq 1.03$, где f_0 – центральная частота рабочего диапазона. С учетом наличия технологических погрешностей и погрешностей эксперимента можно считать приемлемой для практики точность полученных теоретических результатов.

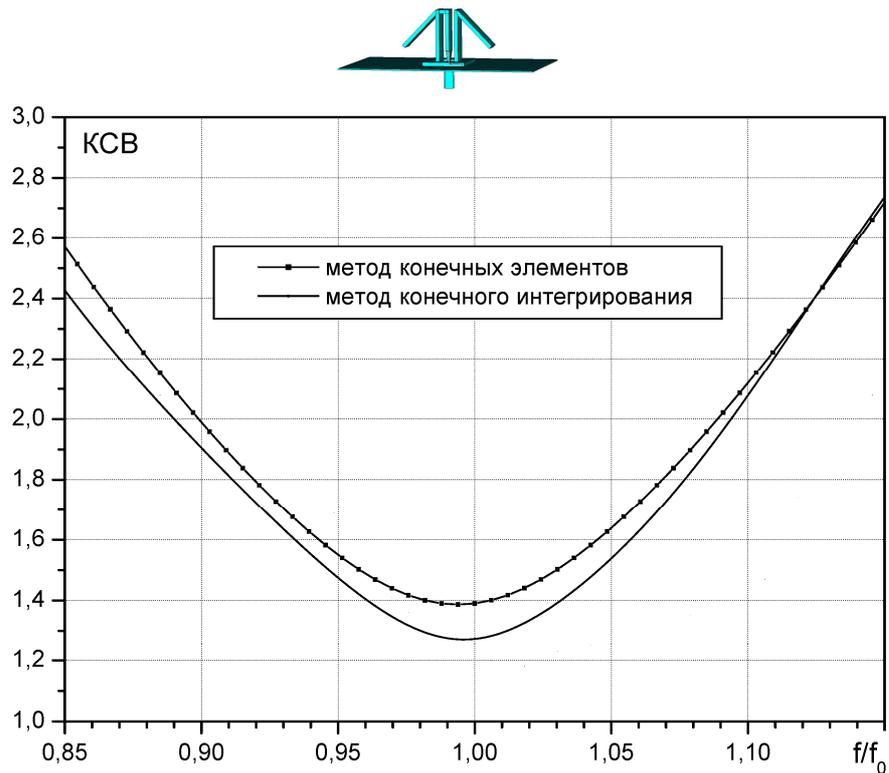


Рис.3. Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик КСВ одиночного V-образного вибратора.

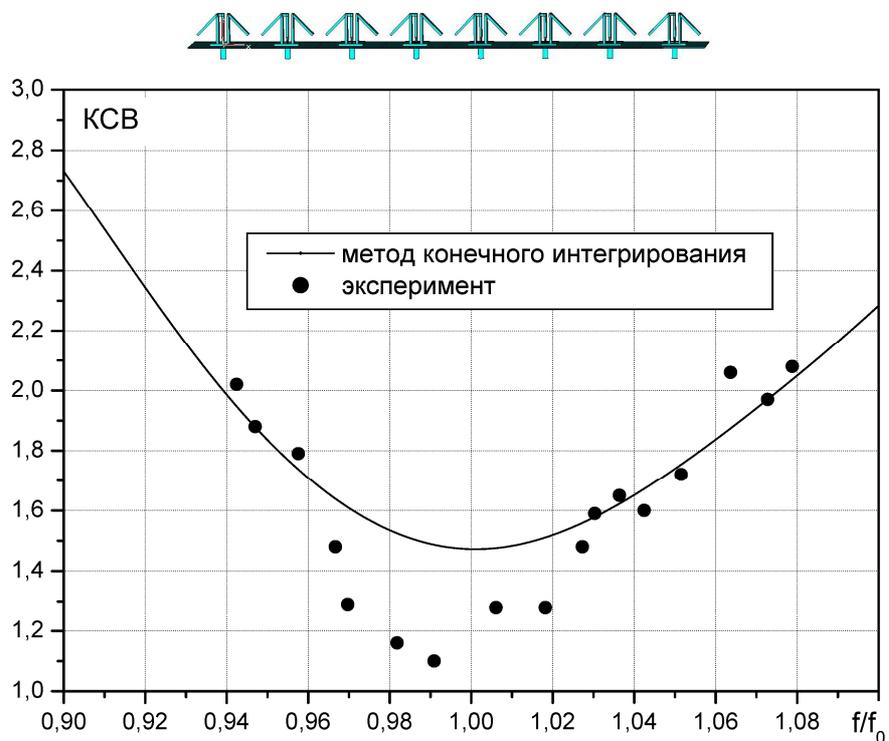


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных частотных характеристик КСВ V-образного вибратора в составе 8-элементной E-плоскостной решетки (возбужден 4-й от края излучатель).

Для исследования характеристик согласования излучателей в составе ФАР была использована электродинамическая модель бесконечной АР (одна ячейка приведена на рис. 1), в которой решение ищется методом конечных элементов, и модель конечной АР 7×7 элементов (рис.2), в которой решение ищется методом конечного интегрирования. Период размещения излучателей в Е-плоскости АР равен $0.53\lambda_0$, в Н-плоскости – $0.48\lambda_0$, что, с одной стороны, позволяет исключить возникновение дифракционных лепестков при заданных секторах сканирования, а, с другой стороны, соответствует конструктивным требованиям к ФАР.

Корректность применения модели конечной АР 7×7 излучателей для оценки характеристик согласования излучателя в составе реальной многоэлементной ФАР была проанализирована на основе исследования коэффициентов взаимной связи при возбуждении центрального элемента АР на рис. 2. Анализ показал, что в рабочем диапазоне частот для данного типа АР два ближайших к возбужденному элементу излучателя в Н-плоскости АР имеют наибольшие коэффициенты связи. Коэффициенты связи двух ближайших к возбужденному элементу излучателей в Е-плоскости АР оказываются примерно в два раза меньше. По мере удаления от центрального (активного) элемента его взаимная связь с другими излучателями довольно быстро уменьшается. В частности, в ближайших к нему элементах, находящихся во втором ряду от центра АР коэффициенты взаимной связи имеют величину около -20 дБ. Это позволяет использовать данную модель для приближенной оценки характеристик согласования излучателя многоэлементной АР.

Частотные зависимости коэффициента отражения при сканировании в Е-плоскости для моделей бесконечной и конечной вибраторных АР приведены на рис. 5, 6. Геометрические размеры излучателя те же, что ранее, размеры экрана в модели бесконечной АР на рис. 1 соответствуют значениям периодов расположения излучателей в Е- и Н-плоскостях. Обе модели показывают, что при не отклоненном луче наличие взаимной связи излучателей приводит к смещению минимума коэффициента отражения в низкочастотную область по сравнению с характеристикой одиночного излучателя. Однако в рабочем диапазоне ФАР ($0.97 \leq f/f_0 \leq 1.03$) почти во всем секторе сканирования (до $\theta_0=40^\circ$) коэффициент отражения не превышает 0.2, что соответствует КСВ=1.5. Отметим, что локальный максимум на кривой для $\theta_0=50^\circ$ (рис. 5), находящийся за пределами рабочей полосы, соответствует возникновению дифракционного лепестка.

Как видно из сравнения рис. 5, 6, результаты, полученные для конечной АР, довольно хорошо согласуются с результатами для бесконечной АР. Некоторые отличия результатов связаны еще и с тем, что в модели конечной АР (рис.2) вместо коаксиальных портов использовались сосредоточенные 50-омные порты, а также несколько упрощена форма согласующей секции полосковой линии.

Результаты расчета частотных характеристик коэффициента отражения при сканировании в Н-плоскости приведены на рис. 7, 8. В этом случае наблюдается более сильный рост коэффициента отражения при отклонении луча, что обусловлено более сильной взаимной связью излучателей в Н-плоскости. Для модели бесконечной АР (рис. 7) уже при $\theta_0=40^\circ$ максимальное значение КСВ излучателя в рабочем диапазоне превышает 2.0, а при

$\theta_0=60^\circ$ имеет величину порядка 3.8. Необходимо отметить, что и при сканировании в H-плоскости, результаты двух моделей оказываются достаточно близкими.

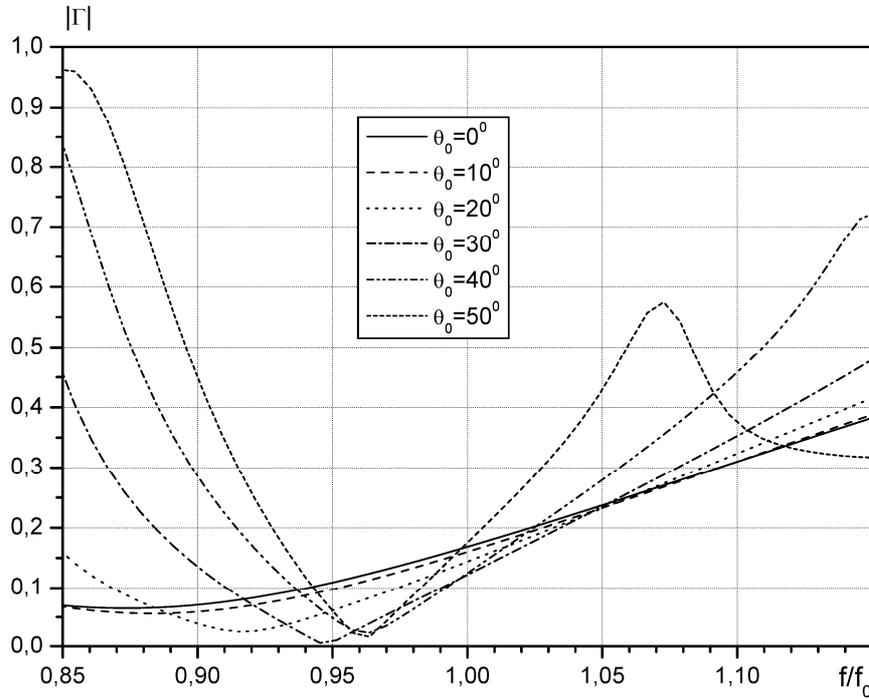


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента отражения элемента в составе бесконечной AP при сканировании в E-плоскости (модель на рис. 1 для метода конечных элементов).

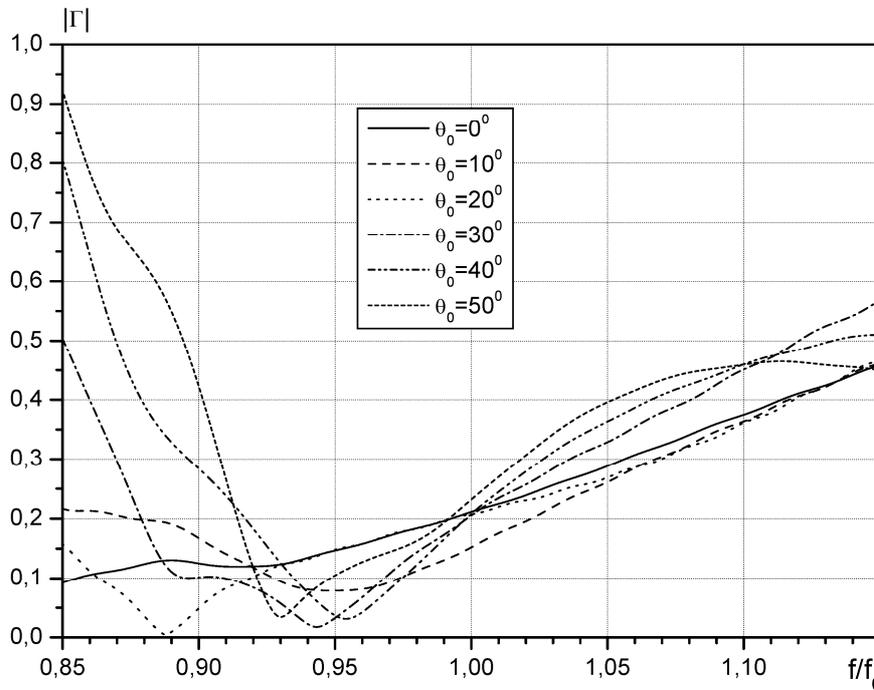


Рис. 6. Частотные зависимости коэффициента отражения центрального элемента в конечной решетке 7×7 активных излучателей при сканировании в E-плоскости (модель на рис. 2 для метода конечного интегрирования).

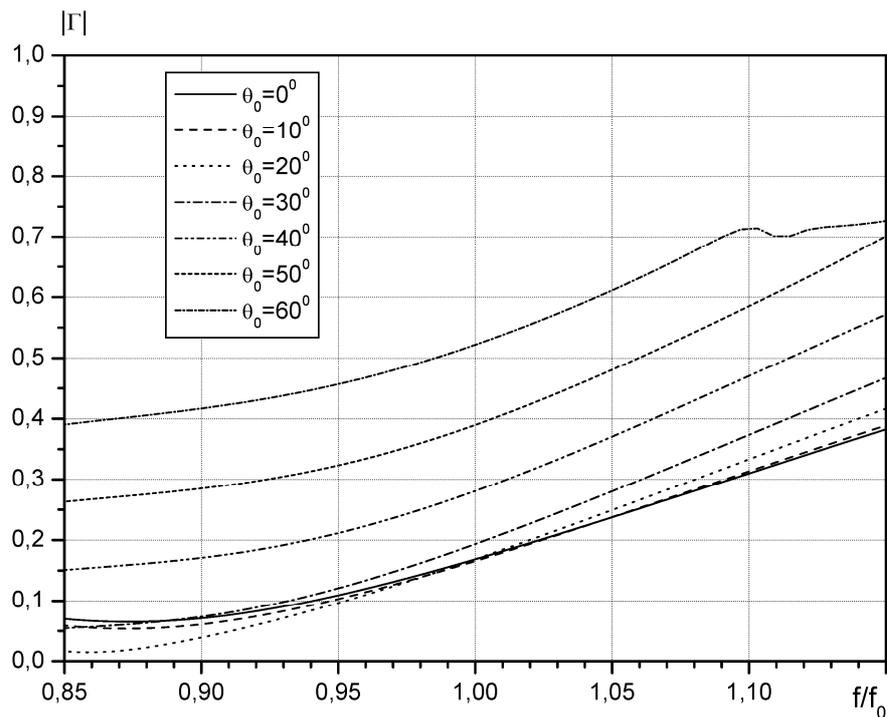


Рис. 7. Частотные зависимости коэффициента отражения элемента в составе бесконечной AP при сканировании в H -плоскости (модель на рис. 1 для метода конечных элементов).

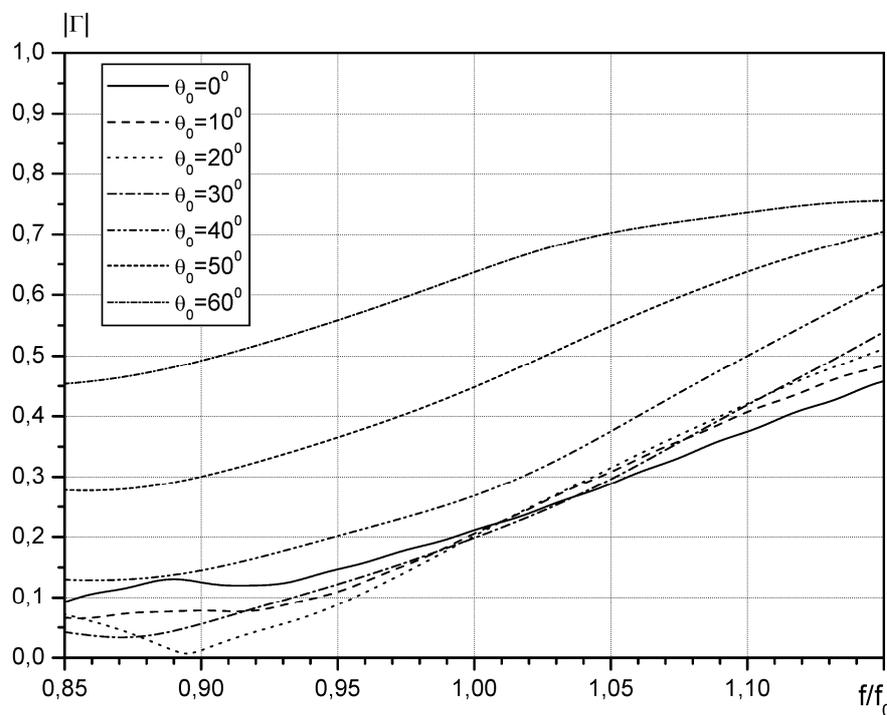


Рис. 8. Частотные зависимости коэффициента отражения центрального элемента в конечной решетке 7×7 активных излучателей при сканировании в H -плоскости (модель на рис. 2 для метода конечного интегрирования).

Из рис. 5, 6 видно, что существует возможность несколько улучшить согласование излучателя при сканировании в Е-плоскости за счет оптимизации его размеров. Однако как следует из характеристик на рис. 7, 8 при сканировании в Н-плоскости величина коэффициента отражения все равно будет оставаться существенно более высокой, чем при сканировании в Е-плоскости. Исходя из сделанных оценок, реально достижимое значение коэффициента отражения и КСВ в заданном секторе сканирования оказывается существенно выше, чем при постановке задачи.

Таким образом, в работе исследована вибраторная ФАР сантиметрового диапазона с плоским раскрытием больших электрических размеров. В качестве излучателей ФАР предложено использовать вибраторы с плоскими наклонными плечами (V-образные вибраторы), размещенные на четвертьволновых стойках над проводящим экраном.

Электродинамическое моделирование характеристик согласования АР выполнено методом конечных элементов на основе модели бесконечной АР и методом конечного интегрирования – на основе модели конечной АР. Результаты сравнения экспериментальных и расчетных характеристик одиночного излучателя и излучателя в составе линейной Е-плоскостной АР демонстрируют хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных.

Результаты исследования частотных характеристик коэффициента отражения для бесконечной и конечной ФАР с вибраторами предложенной геометрии и размеров позволяют сделать вывод о реализуемости КСВ $< 2,5$ в Е- и Н-плоскостях сканирования до углов $\pm 45^\circ$ и КСВ < 4 в Н-плоскости на границах сектора сканирования $\pm 60^\circ$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антенны и устройства СВЧ. Проектирование фазированных антенных решеток. / Под ред. Воскресенского Д.И. – М.: Радио и связь, 1994, 592 с.
2. Mailloux R. J. Phased array theory and technology// *Proc. IEEE*, Vol. 70, N. 3, 1982, pp.246-291.
3. Mayer E., Hessel A. Feed region modes in dipole phased arrays// *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, Vol. 30, N. 1, 1982.
4. Schuman H. K., Pflug D. R., Thompson L. D. Infinite planar arrays of arbitrarily bent thin wire radiators// *IEEE Trans. on Antennas. and Propagat.*, Vol. 32, No. 4, 1984.
5. Fenn A. J. Element gain pattern prediction for finite arrays of V-dipole antennas over ground plane// *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. 36, No. 11, 1988, pp.1629-1633.
6. Jones J. E. Analysis of center-fed V-dipole antenna// *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, Vol. 24, 1976, pp. 316-322.
7. LoTempio J.M., Martinez-Lorenzo J.A., Rappaport C.M., and Aumann H. Design Optimization of an Inverted V-dipole// *PIERS Proceedings*, Cambridge, USA, July 2-6, 2008, pp. 466-470.
8. Bayard J.R., Cooley M. E., Schaubert D. H. Analysis of Infinite Arrays of Printed Dipoles on Dielectric Sheets Perpendicular to a Ground Plane// *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol.39, N.12, 1991, pp.1722-1732.
9. Weiland T. A Discretization Method for the Solution of Maxwell's Equations for Six-Component Fields// *AEU*, vol. 31, 1977, №3, pp.116-120.
10. *CST Microwave Studio*. On-line: <http://www.cst.com> .
11. *Ansoft HFSS*. On-line: <http://www.ansoft.com> .

Мануилов Михаил Борисович – д. ф.-м. н., профессор физического факультета Южного федерального университета. Обл. интересов – микроволновая теория и техника, антенны, антенные решетки.

E-mail: m_manuilov@sfedu.ru

Волошин Виктор Александрович – к. т. н., старший научный сотрудник Ростовского НИИ радиосвязи. Обл. интересов – анализ и синтез антенн и антенных решеток.

Ларин Александр Юрьевич – нач. подразделения Ростовского НИИ радиосвязи. Обл. интересов – антенные системы, обработка сигналов.

Оводов Олег Владимирович – нач. подразделения Ростовского НИИ радиосвязи. Обл. интересов – антенные системы, обработка сигналов.

E-mail: ovodov@rniirs.ru