

Микрополосковые антенные решетки из прямоугольных излучателей

Д. Г. Селезнев, И. И. Резник, А. Д. Селезнев

*Радиоастрономический институт НАН Украины,
Украина, 61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4
E-mail: sad@ira.kharkov.ua*

Статья поступила в редакцию 4 июля 2002 г.

Разработана методика, позволяющая исследовать многоэлементные микрополосковые антенные решетки в приближении заданного распределения поверхностного тока на излучателях. Методика основана на использовании спектрального метода и позволяет учитывать взаимное влияние излучателей в антенной решетке, а также производить их согласование с линиями питания. Выполнен расчет характеристик антенных решеток из 16, 64 и 256 элементов в различном диапазоне частот.

Розроблено методику, яка дозволяє досліджувати багатоеlementні мікрострічкові антенні ґратки в наближенні заданого розподілу поверхневого струму на випромінювачах. Методика базується на використанні спектрального методу та дозволяє враховувати взаємний вплив випромінювачів в антенній ґратці та проводити їх узгодження з лініями живлення. Виконано розрахунок характеристик антенних ґраток з 16, 64 та 256 елементів у різних діапазонах частот.

Введение

Микрополосковые (МП) антенны и антенные решетки (АР) благодаря своим достоинствам (исключительная простота конструкции, дешевизна, малый вес, технологичность) широко применяются в современной технике, причем обладают большими возможностями в миллиметровом диапазоне длин волн.

Микрополосковая АР состоит из излучающих элементов, системы питания и схем фазирования. Решетки изготавливаются методом травления. В качестве диэлектрической подложки чаще используются такие материалы, как тефлон или дюрюид.

Среди многообразия форм элементов, составляющих решетку, наибольшее распространение получили излучатели прямоугольной формы с длиной, несколько меньшей $\lambda/2$, где λ – длина волны в диэлектрике.

Разработке МП антенн посвящены многочисленные статьи, в которых обсуждаются различные аспекты физического анализа процессов в таких антеннах. Вот лишь некоторые из изучаемых проблем: расчет антенн на ограниченных подложках, моделирование узлов питания элементов решетки, исследование многоярусных антенн различной конфигурации, исследование характеристик отражательных решеток, изучение свойств поверхностных волн в МП структурах, построение МП антенн с различной поляризацией и т. д. [1-7].

В этих работах использовались различные электродинамические методы расчета, как строгие, так и приближенные. Наиболее полную информацию о характеристиках МП антенн можно получить, используя строгие численно-аналитические методы прикладной

электродинамики. Однако алгоритмы расчета, основанные на строгих методах, зачастую оказываются настолько сложными и громоздкими, что использовать их для расчета АР представляется нецелесообразным.

В настоящей работе применено сочетание электродинамического подхода и методов теории цепей, что дает возможность при расчете антенн использовать такие величины, как напряжение, ток, матрица сопротивлений и т. д., рассматривая МП антенну как многополюсник СВЧ. Электродинамические методы в данном случае служат для описания процессов внутри многополюсника, а его внешние параметры представлены в радиотехнических терминах.

Следует отметить, что для нормального функционирования МП АР нужно учитывать взаимодействие между элементами решетки, а также взаимодействие с другими устройствами, в том числе с линиями питания. Взаимное влияние излучателей в решетке приводит к таким эффектам, как изменение амплитудно-фазового распределения токов на излучателях и соответствующее искажение диаграммы направленности (ДН), а также рассогласование входов излучателей решетки с линиями питания. Поэтому актуальной является задача создания эффективного алгоритма расчета МП АР, позволяющего не только учитывать взаимное влияние элементов решетки, но и согласовывать эти элементы с линиями питания.

Вопрос о взаимодействии элементов МП АР наиболее полно изучен в работах [1-3]. Проблеме согласования элементов МП АР с линиями питания уделено значительно меньше внимания. Она рассмотрена в [8]. Однако в этой статье не учтено взаимное влияние элементов решетки. В более поздних работах вопросам согласования элементов МП антенн внимание не уделялось. В настоящей работе применена методика, позволяющая не только учитывать взаимодействие элементов в МП АР, но и осуществлять согласование излучателей АР с линиями питания. Эта методика была использована авторами в [9] для исследования антенной решетки из четырех элементов.

Однако, поскольку для большинства практических приложений требуются антенны с шириной ДН в несколько градусов и достаточно высоким коэффициентом усиления (КУ), превышающем 30 дБ, для реализации таких параметров необходимо использовать многоэлементные МП АР, состоящие из нескольких сотен, а то и тысяч элементов. Поэтому целью настоящей работы является развитие упомянутой методики на случай многоэлементных МП АР, а также построение эффективного алгоритма для расчета электродинамических характеристик таких многоэлементных решеток. Все это позволит рассчитывать многоэлементные МП АР, обладающие высоким КУ (более 30 дБ) и имеющие ширину основного лепестка ДН порядка 3 градусов по уровню 3 дБ при уровне боковых лепестков -15 дБ.

Постановка задачи и методика исследования

Рассмотрим решетку, состоящую из N одинаковых прямоугольных МП излучателей, настроенных на частоту f_0 . К каждому излучателю решетки в точке x_{0n} подведена линия питания (рис. 1). Питание может осуществляться как при помощи коаксиального кабеля, так и микрополосковой линией. Линия питания и излучатель согласованы на частоте f_0 . Решетка расположена на слое экранированного диэлектрика, характеризующегося толщиной h и относительной диэлектрической постоянной ϵ .

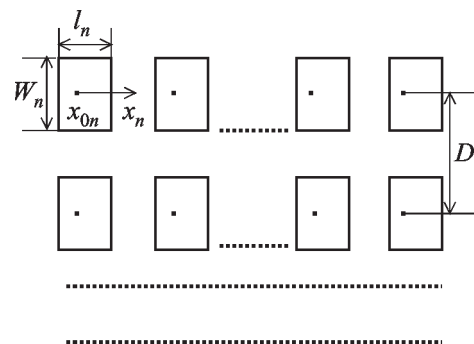


Рис. 1. Микрополосковая антенная решетка

Методика исследования многоэлементных МП АР, состоящих из прямоугольных излучателей, основана на использовании спектрального метода. Суть этого метода заключается в представлении функции Грина, поля излучения и плотности тока на излучателях АР в виде разложений в интегралы Фурье. Спектральное представление поля соответствует физическому содержанию краевых задач с плоскими границами и удобно при анализе характеристик излучения антенн. Применительно к теории антенных решеток, в том числе микрополосковых, спектральный метод развит в работе [10]. Этот метод также широко использован для исследования МП антенн и АР в работах [1-3].

Кроме того, используется приближение заданного распределения поверхностного тока на излучателях [9, 11]. Такое приближение существенно упрощает теоретическое рассмотрение МП антенн. В процессе исследования также учитывалось наличие поверхностной волны и взаимное влияние элементов АР, которое приводит к рассогласованию каждого отдельного излучателя в решетке с линиями питания. В связи с этим для улучшения характеристик АР была применена методика, позволяющая не только учитывать взаимодействие между элементами решетки, но и согласовывать их с линиями питания [9].

Как показано в [11], амплитуду тока на излучателе I можно определить через ток на его входе I_{in} :

$$\hat{I} = \frac{\hat{Z} \hat{I}_{in}}{Z_n^c \cos(\pi x_{0n}/l_n)}, \quad (1)$$

где Z_n^c – характеристическое сопротивление n -го излучателя; l_n – длина излучателя; x_{0n} – значение координаты x в точке питания; \hat{I} , \hat{I}_{in} – векторы амплитуд токов в пучности и на входе излучателя; \hat{Z} – матрица собственных и взаимных сопротивлений.

Если амплитуды токов на излучателях решетки известны, легко получить ее характе-

ристики: диаграмму направленности, коэффициент направленного действия, коэффициент усиления [11].

Из-за взаимного влияния излучателей входное сопротивление каждого из них отличается от собственного сопротивления и может быть найдено по формуле:

$$Z_n^{in} = \frac{1}{I_n^{in}} \sum_{m=1}^N Z_{nm} I_m^{in}, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где Z_n^{in} – элементы матрицы входных сопротивлений, Z_{nm} – элементы матрицы собственных и взаимных сопротивлений решетки, N – количество излучателей в решетке.

Процедура нахождения матрицы собственных и взаимных сопротивлений решетки подробно описана в [11].

Коэффициент отражения на входе излучателя с номером n равен:

$$\rho_n = \frac{Z_n^{in} - Z_l^c}{Z_n^{in} + Z_l^c},$$

где Z_l^c – характеристическое сопротивление линии питания n -го излучателя.

Коэффициент стоячей волны (КСВ) в тракте питания с номером n равен:

$$K_n = \frac{1 + |\rho_n|}{1 - |\rho_n|},$$

Ток на входе излучателя определяется через ток в линии питания из условия равенства напряжений [11]:

$$I_n^{in} = I_n^l \frac{2Z_l^c}{Z_n^{in} + Z_l^c}, \quad (3)$$

где I_n^l – ток в линии питания на входе излучателя.

Подставив (3) в (2), получим:

$$Z_n^{in} = Z_{nn} + \sum_{m=1, m \neq n}^N Z_{nm} \frac{Z_n^{in} + Z_n^c I_m^l(0)}{Z_n^{in} + Z_n^c I_n^l(0)}, \quad (4)$$

$n = 1, 2, \dots, N$.

Выражение (4) представляет собой систему N нелинейных уравнений относительно входных сопротивлений Z_n^{in} .

Поскольку, как правило, взаимные сопротивления малы по сравнению с собственными сопротивлениями, система (4) допускает решение методом последовательных приближений.

Когда число элементов решетки незначительно, их взаимное влияние приводит к малым изменениям характеристик излучения. Однако если антенная решетка состоит из большого числа элементов, то их взаимное влияние приведет к рассогласованию каждого элемента с линией питания, а следовательно, к увеличению КСВ и ухудшению характеристик АР. Исправить ситуацию можно путем дополнительного согласования элементов решетки с линиями питания.

В процессе согласования необходимо найти такие размеры излучателей, составляющих антенную решетку, при которых входные сопротивления становятся чисто активными и равными характеристическому сопротивлению линии питания. Таким образом, в общем случае необходимо решить систему из $2N$ трансцендентных уравнений относительно размеров излучателей, составляющих АР:

$$\begin{cases} \operatorname{Re} Z_n^{in} = Z_l^c \\ \operatorname{Im} Z_n^{in} = 0, \quad n = 1, 2, \dots, N. \end{cases} \quad (5)$$

Количество уравнений в системе (5) определяется числом излучателей, которые имеют различные входные сопротивления. Так, для решетки из четырех элементов порядок системы уравнений (5) равен 2.

Процедура согласования представляет собой итерационный процесс, для которого начальное приближение определяется из условия согласования отдельного излучателя (не-

скольких излучателей) с линией питания. Эта процедура реализована на ПК с помощью метода Ньютона.

Обсуждение результатов

С помощью приведенной выше методики осуществлен процесс согласования решетки из 16 элементов. В качестве начального приближения для итерационного процесса по формуле (5) взяты размеры излучателя четырехэлементной решетки. Вследствие симметрии 16-элементная решетка будет состоять из излучателей четырех различных размеров. В результате согласования их размеры получились равными: $W_1 = 2.1$ мм, $l_1 = 2.07$ мм; $W_2 = 1.8$ мм, $l_2 = 2.08$ мм; $W_3 = 2.3$ мм, $l_3 = 2.05$ мм; $W_4 = 1.86$ мм, $l_4 = 2.07$ мм. ($\epsilon = 2.2$, $h = 1.6$ мм, $f = 35$ ГГц, характеристическое сопротивление линии питания – 200 Ом). Параметры решетки в рассматриваемом случае имеют следующие значения: КУ = 20.7 дБ, ширина ДН по уровню 3 дБ составляет 16°, а уровень боковых лепестков не более –12 дБ (см. рис. 2 – кривая 1). Угол θ измеряется от нормали к плоскости решетки.

Также были исследованы характеристики антенной решетки из 64 элементов ($\epsilon = 2.2$, $h\sqrt{\epsilon/\lambda_0} = 0.08$ мм, $f = 10, 20, 30, 35$ ГГц, характеристическое сопротивление линий пита-

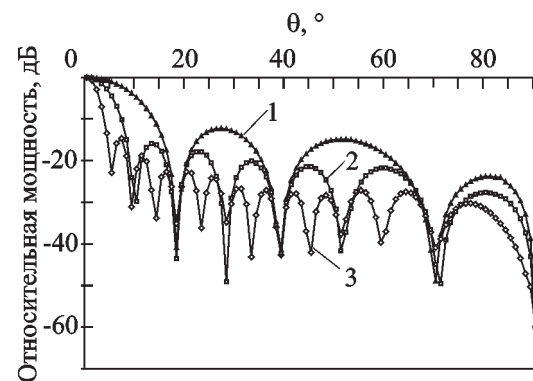


Рис. 2. Диаграммы направленности антенных решеток: кривая 1 – 16 элементов; кривая 2 – 64 элемента; кривая 3 – 256 элементов)

ния – 200 Ом). В качестве начального приближения для процесса согласования были взяты размеры элементов решетки из 16 излучателей. Коэффициент усиления такой решетки равен 27 дБ, ширина ДН (по уровню 3 дБ) составляет 8° , а уровень боковых лепестков не больше –16 дБ (см. рис. 2 – кривая 2).

Рассмотрим антенную решетку, состоящую из 256 элементов. Выполнить согласование такой решетки так же, как это было сделано для АР из 16 и 64 элементов, не удастся из-за большого объема вычислений, поэтому необходимо разработать алгоритм выбора размеров элементов решетки, который позволил бы достичь требуемых параметров, а именно КСВ ~ 1.5 .

Был выполнен расчет АР с элементами, размеры которых выбирались следующим образом: центральные элементы (имеющие окружение со всех сторон) – как центральные в решетке из 16 элементов; крайние (не имеющие окружения с какой-либо стороны) – как крайние в решетке из 16 элементов. Исследования показали, что значение КСВ в данном случае в зависимости от номера элемента решетки изменяется в пределах $1.27 \div 2.26$.

Однако для практических приложений, как уже отмечалось выше, желательно иметь КСВ, значение которого не превышает 1.5. Следовательно, необходимо искать другие пути выбора размеров элементов АР. Для этого была разработана иная методика выбора размеров элементов в решетке, состоящая в следующем. На первом этапе необходимо провести исследование вопроса о количестве элементов, которые необходимо учитывать в E - и H -плоскостях (в данном случае в E -плоскости расположена ось x_n , H -плоскость перпендикулярна E -плоскости, и обе они перпендикулярны плоскости решетки). После этого, на втором этапе, находится элементарная ячейка, размеры элементов которой определяют размеры элементов решетки в целом. Под элементарной ячейкой будем понимать такую конфигурацию из минимального числа элементов решетки, для которой увеличение числа элементов не приводит к изменению входного сопротивления центральных элементов ячейки. На третьем этапе иссле-

дуется вся антенная решетка, причем размеры ее элементов определяются размерами элементов элементарной ячейки.

Исследования, проведенные по определению количества элементов, которые необходимо учитывать в E - и H -плоскостях, показали, что в H -плоскости достаточно учитывать по одному соседнему элементу, вклад последующих элементов практически не оказывает влияния на входное сопротивление центрального элемента. Так, учет по одному ближайшему элементу в H -плоскости дает ошибку $2 \div 3\%$ в определении входного сопротивления и приводит к изменению КСВ на 0.01.

Совсем по-другому обстоит дело в E -плоскости. Расчеты показали, что в этом случае необходимо учитывать не менее 10 элементов с каждой стороны. При этом ошибка в определении действительной части входного сопротивления равна 6% , а мнимой части – 12% , что соответствует изменению значения КСВ на 0.03. Необходимость учета существенно большего числа элементов в E -плоскости связана с тем, что максимум излучения поверхностной волны в диэлектрической подложке лежит как раз в E -плоскости, а это приводит к заметному взаимному влиянию элементов решетки в этом направлении.

Проведенные исследования показали, что для решетки из 256 (16×16) элементов в элементарную ячейку необходимо включать три линейки, из 16 элементов каждая, т. е. необходимо учитывать взаимное влияние по одному соседнему элементу в H -плоскости и всех элементов в E -плоскости.

В работе исследована решетка из 256 элементов, размеры которых соответствуют размерам элементов, составляющих элементарную ячейку. В этом случае КСВ для любого из элементов решетки не превышает значения 1.6 на частоте 35 ГГц. Поведение КСВ в полосе частот представлено на рис. 3. На рис. 2 (кривая 3) приведена диаграмма направленности решетки из 256 элементов ($\epsilon = 2.2$, $h = 0.5$ мм, $f = 35$ ГГц, характеристическое сопротивление линии питания – 200 Ом). Ширина ДН такой решетки составляет 4° по уровню 3 дБ, а уровень боковых лепестков не превышает зна-

чения -15 дБ. Коэффициент усиления составляет 33 дБ. Поведение КУ в полосе частот представлено на рис. 4. Апертура решетки представляет собой площадку размером 140×140 мм².

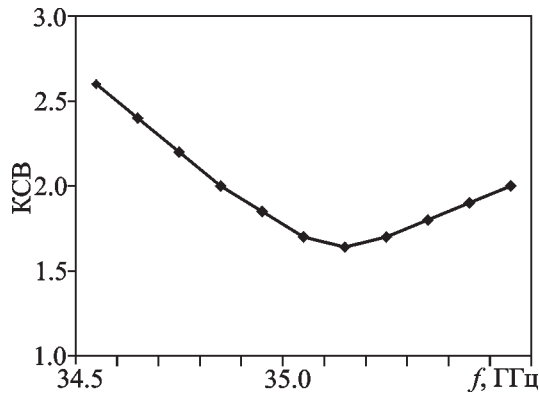


Рис. 3. Зависимость KCB от частоты для МП АР из 256 элементов

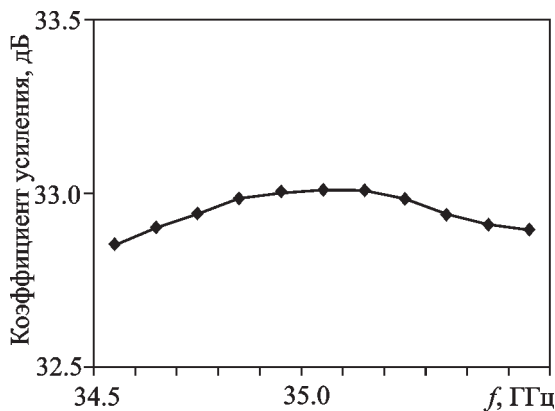


Рис. 4. Зависимость КУ от частоты для МП АР из 256 элементов

Следует подчеркнуть, что расчеты характеристик всех исследовавшихся в работе решеток проводились на частотах 10, 20, 30, 35 ГГц. В таблице 1 приведены значения коэффициента усиления МП АР для всех рассмотренных решеток на различных частотах. Там же приведены экспериментальные дан-

Таблица 1. Расчетное/экспериментальное значение коэффициента усиления МП АР в дБ

Частота, ГГц	Количество элементов		
	16	64	256
10	20.7/19.5	26.8/25.0	33.0/29.5
20	20.7/19.8	27.1/24.5	33.0/29.7
30	20.6/19.5	27.1/24.0	33.0/28.5
35	20.6/19.0	27.1/24.0	33.0/28.5

ные из [8]. Эксперимент проводился с решеткой, состоящей из одинаковых элементов, питание которых осуществлялось с помощью микрополосковых линий. Различие в теоретических и экспериментальных данных связано с тем, что элементы решетки, рассчитанной в настоящей работе, были согласованы с линиями питания. Кроме того, при теоретическом рассмотрении не учитывалось излучение краев апертуры.

Заключение

Разработана методика расчета многоэлементных антенных решеток с учетом взаимного влияния излучателей в решетке и согласования их с линиями питания. Рассчитаны характеристики антенных решеток, состоящих из 16, 64 и 256 элементов. Показана возможность достижения характеристик излучения, отвечающих требованиям современной антенной техники.

Литература

1. D. M. Pozar. IEEE Trans. Antennas Propag. 1982, **AP-30**, No. 6, pp. 1191-1196.
2. D. M. Pozar. IEEE Trans. Antennas Propag. 1983, **AP-31**, No. 5, pp. 740-747.
3. D. M. Pozar. IEEE Trans. Antennas Propag. 1986, **AP-34**, No. 5, pp. 658-665.
4. H. J. Stalrer, J. Lubin, A. Hessel, J. Shmoys. IEEE Trans. Antennas Propag. 1990, **AP-38**, No. 5, pp. 770-773.
5. C. Wang, G. Ling, J. Jin. IEEE Trans. Antennas Propag. 1998, **AP-46**, No. 10, pp. 1467-1474.
6. H. D. Jang, R. Kim, D. R. Jackson. IEEE Trans. Antennas Propag. 2000, **AP-48**, No. 12, pp. 2233-2239.
7. J. Encinar. IEEE Trans. Antennas Propag. 2001, **AP-49**, No. 10, pp. 1403-1410.
8. E. Levine, G. Malamud, S. Shtrikman, D. Treves. IEEE Trans. Antennas Propag. 1989, **AP-33**, No. 4, pp. 426-434.
9. С. Л. Просвирнин, И. И. Резник, Д. Г. Селезнев. Радиотехника и электроника. 1998, **43**, №10, с. 1-4.
10. А. Ф. Чаплин. Анализ и синтез антенных решеток. Львов, Вища школа, 1987, 180 с.
11. С. Л. Просвирнин, Ю. Б. Нечаев. Расчет микрополосковых антенн в приближении заданного распределения поверхностного тока. Воронеж, Изд-во Воронежского ун-та, 1992, с. 112.

Microstrip Antenna Arrays Composed of Rectangular Radiators

**D. G. Seleznyov, I. I. Reznik,
A. D. Seleznyov**

The technique for investigation of multielement microstrip antenna array is developed. It uses the approximation of given surface current distribution on radiators. The approach is based on the spectral method. It allows to take into consideration the mutual coupling of radiators in array and match radiators with feeding line. The calculations of array characteristics in several frequency bands is performed for 16, 64 and 256 element antennas.