

## Микрополосковый облучатель зеркальных антенн

Д. Г. Селезнёв, И. И. Резник, А. Д. Селезнёв

Радиоастрономический институт НАН Украины  
61002, г. Харьков, ул. Краснознаменная, 4

Статья поступила в редакцию 21 января 2000 г.

В данной работе выполнено теоретическое исследование многоэлементной микрополосковой антенной решетки, которая формирует поле круговой поляризации и может применяться в качестве облучателя зеркальных спутниковых антенн. Впервые примененная к расчету такого типа антенн методика позволяет учитывать взаимное влияние элементов антенной решетки и даёт возможность осуществлять согласование отдельных излучателей в решетке с линиями питания.

У даній роботі виконано теоретичне дослідження багатоелементної мікросрічкової антенної ґратки, яка формує поле кругової поляризації та може використовуватись як опромінювач дзеркальних супутникових антен. Вперше використана методика досліджень антен такого типу дає можливість враховувати взаємний вплив елементів антенної ґратки та виконувати узгодження її окремих випромінювачів з лініями живлення.

### Введение

Зеркальные антенны находят широкое применение в спутниковых системах связи, в частности в системах с подвижными наземными объектами. Для формирования лучей таких зеркальных антенн в качестве облучателей могут использоваться многоэлементные антенные решетки (АР), в том числе и микрополосковые (МП) с круговой поляризацией электромагнитного поля.

Возможность получения поля с круговой поляризацией посредством микрополосковых антенных решеток (МПАР) показана в [1]. Такая решетка может быть выполнена из четырех прямоугольных излучателей, возбуждаемых со сдвигом фазы кратным  $\pi/2$ . Исследование характеристик МПАР с круговой поляризацией поля, состоящих из четырех и большего числа элементов, выполнено в работах [1,2]. Но в этих работах не учитывалось наличие поверхностной волны в диэлектрической подложке, являющейся необходимым элементом этих антенн, и взаимное влияние излучателей. Однако, как правило, пренебречь взаимодействием элементов решетки нельзя. Это взаимодействие приводит к изменению амплитудно-фазового распределения тока на излучателях по сравнению с распределением на невзаимодействующих излучателях и соответствующим изменениям в диаграмме направленности (ДН). Входные сопротивления излучателей изменяются, причем различным образом при разном амплитудно-фазовом распределении токов на их входах. Появляются потери мощности, обусловленные рассогласованием излучателей с питающим трактом при изменении направле-

ния фазирования. Поэтому при исследовании МПАР особо важным является вопрос о создании эффективного алгоритма расчета МПАР, который позволил бы не только учитывать взаимодействие между элементами решетки, но и согласовывать их с линиями питания.

Целью данной работы является построение эффективного алгоритма расчета характеристик облучателя зеркальных антенн, создающего электромагнитное поле круговой поляризации, с учетом наличия поверхностной волны в диэлектрической подложке и взаимного влияния между элементами антенны. Такой облучатель представляет собой МПАР из четырех, шестнадцати или двадцати восьми прямоугольных линейно-поляризованных излучателей, которые запитываются с соответствующим сдвигом фазы. Кроме того, для улучшения характеристик МПАР применена методика, позволяющая согласовывать элементы антенны с линиями питания. Все это дает возможность добиться реализации оптимальных характеристик излучения исследуемых МПАР.

### Метод исследований и постановка задачи

Методика исследований МПАР основана на применении спектрального метода. Он соответствует физическому содержанию краевых задач для структур с плоскими границами и удобен при анализе характеристик излучения антенн. Также используется приближение заданного распределения поверхностного тока на излучателях. В рамках данного приближения распределение тока считается известным и задается некоторой функцией, с одной стороны, достаточно хорошо приближающей истин-

ное распределение тока, а с другой стороны, удобной для использования в последующем анализе. Это приближение существенно упрощает теоретическое рассмотрение таких сложных электродинамических систем, как МПАР, и дает возможность получать достаточно точные результаты при их исследовании [3]. Кроме того, в процессе теоретического исследования учитывалось наличие поверхностной волны и взаимное влияние между элементами АР, которое приводит к рассогласованию каждого отдельного излучателя в решетке с линией 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. Разработанная авторами методика учета взаимного влияния элементов в АР и согласования их с линиями питания приведена в [4].

Рассмотрим решетку, состоящую из четырех одинаковых прямоугольных МП излучателей, расположение которых показано на рис. 1, а. Решетка настроена на частоту  $f_0$ , и каждый

излучателем –  $(x_n, y_n)$ , причем длина излучателя  $l_n$  измеряется вдоль оси  $x_n$  (см. рис. 1, а). Питание каждого излучателя осуществляется в точке  $x_{0n}$  с соответствующей фазой. Поскольку каждый излучатель находится в условиях близких к резонансным, т. е. длина излучателя несколько меньше половины длины волны в диэлектрической подложке, то поверхностная плотность тока на каждом из них имеет только  $x_n$ -составляющую в локальной системе координат  $(x_n, y_n)$ . Как уже отмечалось, в случае такого расположения излучателей и возбуждения их с фазами  $\phi$ , указанными на рисунке, данная решетка формирует поле круговой поляризации.

Поскольку в работе кроме четырехэлементной исследуются решетки из шестнадцати и двадцати восьми излучателей, каждую из которых удобно представить как совокупность четырех и семи четырехэлементных решеток соответственно, в дальнейшем решетку из четырех элементов будем называть подрешеткой. В соответствии с этим, каждый кружок на рис. 1, б, в обозначает отдельную подрешетку. Причем размеры элементов в каждой подрешетке одинаковы.

Распределение плотности поверхностного тока на каждом элементе решетки считается заданным и имеет вид:

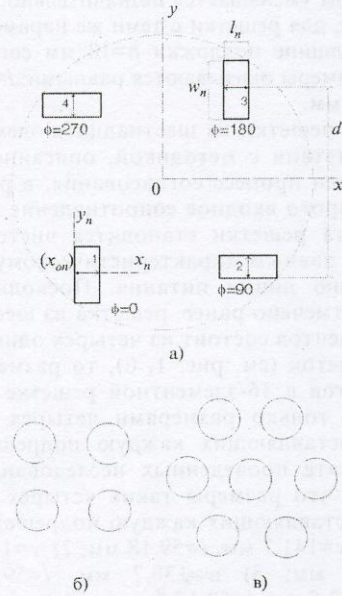


Рис. 1. Схемы МПАР из 4 (а), 16 (б), 28 (в) излучателей

излучатель согласован с линией питания на данной частоте. Решетка расположена на слое экранированного диэлектрика, который имеет толщину  $h$  и относительную диэлектрическую постоянную  $\epsilon$ . Излучатели имеют длину (резонансный размер)  $l_n$  и ширину  $w_n$ . Локальная система координат, связанная с каждым

$$\vec{J}(x_n, y_n) = \begin{cases} \vec{e}_{x_n} I_n / w_n \sin(\beta x_n) & \text{при} \\ 0 < x_n < l_n, -w_n / 2 < y_n < w_n / 2; \\ 0, & \text{вне излучателя;} \end{cases} \quad (1)$$

где  $n = 1, 2, 3, 4$ ;  $I_n$  – амплитуда тока на излучателе,  $\beta = \pi / l_n$ .

Учитывая, что первый и третий элементы решетки имеют составляющую тока, направленную только вдоль оси  $x$ , а второй и четвертый элементы – только вдоль оси  $y$ , спектральную плотность поверхностного тока на всей решетке [3] можно представить в виде:

$$\begin{cases} \tilde{J}_n^x = \delta_n I_n \frac{2\pi k_0 l_n \cos(k_x l_n / 2)}{k_x^2 l_n^2 - \pi^2} \exp(-i\delta_n \frac{k_x l_n}{2}) \times \\ \times \text{inc}(k_y \frac{w_n}{2}) \exp\{i(k_x x_{0n} + k_y y_{0n})\}, \\ \tilde{J}_n^y = \delta_n I_n \frac{2\pi k_0 l_n \cos(k_y l_n / 2)}{k_y^2 l_n^2 - \pi^2} \exp(-i\delta_n \frac{k_y l_n}{2}) \times \\ \times \text{inc}(k_x \frac{w_n}{2}) \exp\{i(k_x x_{0n} + k_y y_{0n})\}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\delta = \begin{cases} -1, & n = 1 \text{ и } 4; \\ 1, & n = 2 \text{ и } 3; \end{cases} \quad \text{inc}(x) = \frac{\sin(x)}{x};$

$k_x = k_0 \sin \theta \cos \phi; \quad k_y = k_0 \sin \theta \sin \phi; \quad k_0 = 2\pi/\lambda_0;$   
 $\lambda_0$  – длина волны в свободном пространстве;  
 $\theta, \phi$  – углы сферической системы координат, связанной с центром решетки, причем угол  $\theta$  отсчитывается от нормали к плоскости решетки.

Согласно [3,4] после определения амплитуды токов на излучателях  $I_n$ , можно получить все основные характеристики такой решетки: ДН ( $F$ ), коэффициент направленного действия ( $D$ ), коэффициент усиления ( $G$ ).

В итоге выражение для ДН рассматриваемой решетки имеет вид:

$$F(\theta, \phi) = \frac{15}{\pi} \left\{ \frac{|\tilde{J}_-(\theta, \phi)|^2}{\cos^2 \theta + (\epsilon - \sin^2 \theta) \text{ctg}^2(kh\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})} + \frac{|\tilde{J}_+(\theta, \phi)|^2 (\epsilon - \sin^2 \theta)}{(\epsilon - \sin^2 \theta) + \epsilon^2 \cos^2 \theta \text{ctg}^2(kh\sqrt{\epsilon - \sin^2 \theta})} \right\} \cos^2 \theta, \quad (3)$$

где  $\tilde{J}_-(\theta, \phi) = \sum_n \{ \tilde{J}_n^y(\theta, \phi) \cos \phi - \tilde{J}_n^x(\theta, \phi) \sin \phi \}$   
 $\tilde{J}_+(\theta, \phi) = \sum_n \{ \tilde{J}_n^y(\theta, \phi) \cos \phi + \tilde{J}_n^x(\theta, \phi) \sin \phi \}.$

$\tilde{J}_n^x$  и  $\tilde{J}_n^y$  определяются из (2),  $n$  – число излучателей в решетке.

В выражении (3) первое слагаемое определяется азимутальной составляющей вектора напряженности электрического поля  $E_\phi$ , а второе – меридианной –  $E_\theta$ . Коэффициент эллиптичности определяется отношением меридианной и азимутальной составляющих электрического поля. Таким образом, зная  $E_\theta$  и  $E_\phi$ , можно определить поляризационную ДН, которая представляет собой зависимость коэффициента эллиптичности от направления на точку наблюдения. Выражение для поляризационной ДН легко получить из (3).

Для улучшения характеристик МПАР, в частности коэффициента стоячей волны (КСВ), необходимо выполнить процедуру согласования элементов решетки с линиями питания. Детали этой процедуры описаны в [4], а суть заключается в нахождении таких размеров излучателей антенной решетки, при которых мнимая часть входного сопротивления равна нулю, а действительная – равна характеристическому сопротивлению линии питания  $z$ .

### Обсуждение результатов

Исследовалась решетка из четырех элементов с одинаковыми размерами, каждый из которых согласован с линией питания, имеющей характеристическое сопротивление  $z=200$  Ом. Элементы решетки расположены друг от друга на расстоянии  $d=0.8\lambda_0$ . Диэлектрическая подложка имеет диэлектрическую проницаемость  $\epsilon=2.5$  и толщину  $h=2$  мм. Данная решетка симметрична относительно поворота на угол  $\phi=\pi/2$ . В результате взаимного влияния каждый из излучателей решетки оказывается рассогласованным с линией питания, что приводит к необходимости дополнительного согласования элементов решетки. Размеры излучателей были получены в результате применения процедуры согласования и оказались равными:  $l=59.2$  мм;  $w=148.2$  мм на частоте  $f=1.55$  ГГц, которая соответствует рабочей частоте на линии искусственный спутник Земли – Земля.

Исследования показали, что увеличение толщины подложки приводит к уменьшению ширины излучателей, резонансный размер  $l$  при этом уменьшается незначительно. Так, например, для решетки с теми же параметрами и при толщине подложки  $h=10$  мм согласованные размеры оказываются равными:  $l=54.4$  мм,  $w=74.5$  мм.

Для решетки из шестнадцати элементов в соответствии с методикой, описанной в [4], выполнен процесс согласования, в результате которого входное сопротивление каждого элемента решетки становится чисто активным и равным характеристическому сопротивлению линии питания. Поскольку, как было отмечено ранее, решетка из шестнадцати элементов состоит из четырех одинаковых подрешеток (см. рис. 1, б), то размеры всех элементов в 16-элементной решетке определяются только размерами четырех элементов, составляющих каждую подрешетку. В результате проведенных исследований оказалось, что размеры таких четырех элементов, составляющих каждую подрешетку равны: 1)  $w=141.7$  мм,  $l=59.18$  мм; 2)  $w=145.4$  мм,  $l=59.14$  мм; 3)  $w=130.7$  мм,  $l=59.22$  мм; 4)  $w=133.5$  мм,  $l=59.17$  мм.

ДН всех исследуемых решеток в случае равномерного возбуждения представлены на рис. 2 ( $\epsilon=2.5, f=1.55$  ГГц,  $h=2$  мм,  $d/\lambda_0=0.8, z=200$  Ом,  $w=148.2$  мм,  $l=59.2$  мм). Угловая полуширина основного лепестка ДН по уровню 3 дБ, уровень первых боковых лепестков, а также коэффициент усиления (см. далее рис. 6) для решетки из четырех элементов (сплошная линия) составляют соответственно: 16°, 10.2 дБ, 14.9 дБ.

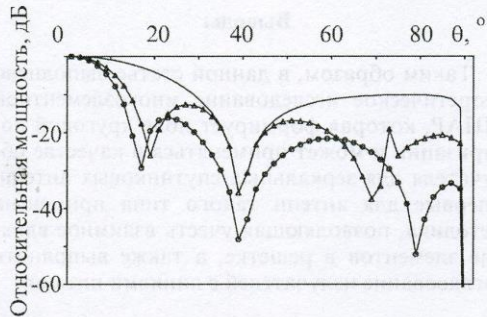


Рис. 2. Диаграммы направленности МПАР из 4 (сплошная линия), 16 (треугольники) и 28 (кружки) элементов с равномерным возбуждением

Для решетки из шестнадцати элементов (треугольники): 8°, 12.7 дБ, 21.9 дБ. Для решетки из двадцати восьми элементов (кружки): 6.5°, 16.1 дБ, 24.3 дБ. Коэффициент эллиптичности в направлении максимума излучения для всех исследуемых решеток не хуже -0.2 дБ.

Решетку из двадцати восьми элементов можно условно разбить на две части – центральную и периферийную. Центральная часть содержит одну центральную подрешетку, а периферийная – шесть остальных подрешеток. Каждую из периферийных подрешеток (рис. 1, в) можно возбуждать с амплитудой, меньшей амплитуды возбуждения центральной подрешетки, что дает возможность существенно уменьшить уровень боковых лепестков. ДН решетки из двадцати восьми элементов с током возбуждения, убывающим к периферии, приведены на рис. 3. Так, если в случае равномерного возбуждения данной решетки уровень первого бокового лепестка составляет -16 дБ при  $\theta=22^\circ$  (см. рис. 2, кружки), то при возбуждении периферийных подрешеток на уровне -13 дБ уровень бокового лепестка составляет -19.8 дБ при  $\theta=84^\circ$  (см. рис. 3,

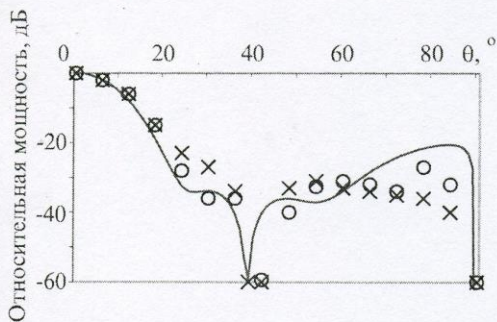


Рис. 3. Диаграмма направленности МПАР из 28 элементов с неравномерным возбуждением (сплошная линия – расчет, кружки – эксперимент из [1], крестики – теория из [1])

сплошная линия). Следует отметить, что при этом КСВ для элементов центральной подрешетки не больше 1.15. На рис. 3 сплошной линией представлена ДН, рассчитанная в данной работе, кружками – экспериментальные данные из [1], а крестиками – теоретические данные из [1]. Нетрудно видеть, что в пределах главного лепестка наблюдается хорошее совпадение с экспериментальными данными. В области бокового лепестка ДН, рассчитанная в данной работе с учетом наличия поверхностной волны в диэлектрической подложке и с учетом взаимного влияния излучателей в решетке, лучше совпадает с экспериментальной диаграммой, чем полученная в [1] без учета поверхностной волны и взаимного влияния.

Поляризационные ДН для всех типов исследуемых решеток представлены на рис. 4. Из графика видно, что коэффициент эллиптичности в направлении  $\theta=35^\circ$  не хуже -3 дБ для всех решеток. А в направлении, перпендикулярном плоскости решетки ( $\theta=0^\circ$ ) коэффициент эллиптичности не хуже -0.2 дБ.

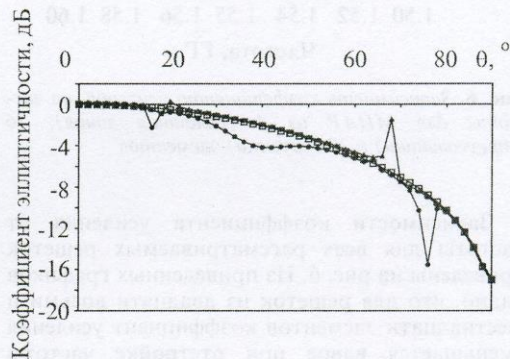


Рис. 4. Коэффициент эллиптичности МПАР из 4 (сплошная линия), 16 (треугольники) и 28 (кружки) элементов

Поскольку решетка из четырех элементов согласована с линиями питания, то во всех питающих трактах КСВ равен 1. Зависимость КСВ от полосы частот для решетки из четырех элементов представлена на рис. 5. При отстройке частоты на 0.65% от центральной КСВ увеличивается до 3, а коэффициент усиления при этом уменьшается на 1.5 дБ. Для решетки из двадцати восьми элементов на центральной частоте КСВ не хуже 1.5. Также следует отметить, что увеличение толщины подложки приводит к существенному увеличению КСВ и уменьшению коэффициента усиления, что связано с увеличением мощности, переносимой поверхностной волной.

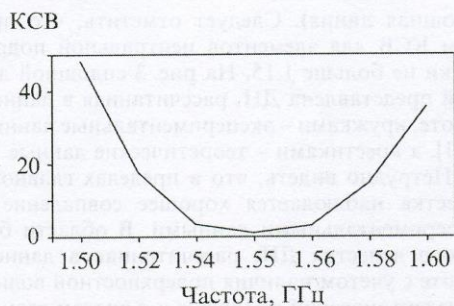


Рис. 5. Зависимость КСВ от частоты для МПАР из четырех элементов

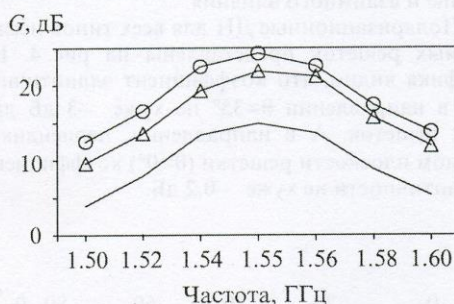


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от частоты для МПАР из 4 (сплошная линия), 16 (треугольники) и 28 (кружки) элементов

Зависимости коэффициента усиления от частоты для всех рассматриваемых решеток приведены на рис. 6. Из приведенных графиков видно, что для решеток из двадцати восьми и шестнадцати элементов коэффициент усиления уменьшается вдвое при отстройке частоты приблизительно на 3% от центральной частоты.

### Выводы

Таким образом, в данной статье выполнено теоретическое исследование многоэлементной МПАР, которая формирует поле круговой поляризации и может применяться в качестве облучателя для зеркальных спутниковых антенн. Впервые для антенн такого типа применена методика, позволяющая учесть взаимное влияние элементов в решетке, а также выполнить согласование излучателей с линиями питания.

### Литература

1. J. Huang. IEEE Trans. Antennas and Propag. 1986, AP-34, No. 9, pp. 1113-1124.
2. J. Huang, V. Jamnejad. IEEE Trans. Antennas and Propag. 1989, AP-37, No. 2, p.153-158.
3. С. Л. Просвирнин, Ю. Б. Нечаев. Расчет микрополосковых антенн в приближении заданного распределения поверхностного тока. Воронеж, изд-во Воронежского ун-та, 1992, с. 112.
4. С. Л. Просвирнин, И. И. Резник, Д. Г. Селезнёв. Радиотехника и электроника. 1998, 43, №10, с. 1-4.

### Microstrip Radiator for Reflector Antennas

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

The using of the antenna array as illuminator in reflector antenna to obtain the circular polarization of the radiating electromagnetic wave has been investigated. Being used in the calculation of such type of antennas for the first time, the suggested methodics takes into consideration the mutual coupling between separate patches of mentioned array and antenna patches matching with its feeding lines.