УДК 621.396.41

Р.Т. Максимидис, Д. Карателли, Дж. Тосо, Б.А. Смолдерс

Анализ нового класса волноводных структур для проектирования реактивно-нагруженных антенных решёток

Проведён анализ волноводов с суперэллиптическим сечением и рассматриваются преимущества их использования для проектирования реактивно-нагруженных антенных решеток. Показано, каким образом использование волноводов с суперэллиптическим сечением предоставляет контроль связи по свободному пространству между излучателями. В свою очередь, это добавляет в процесс дизайна дополнительную степень свободы.

Ключевые слова: суперэллипс, антенные решетки, реактивная нагрузка, волновод.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-09-13

В данной работе показаны преимущества использования волноводов с суперэллиптическим сечением для проектирования реактивно-нагруженных решеток. В своей книге [1] С.П. Скобелев детально описывает синтез диаграммы направленности антенной решетки с помощью пассивных, реактивно-нагруженных, волноводов. Реактивная нагрузка на пассивных волноводах осуществляется с использованием короткозамыкателей, положение которых определяет величину реактивных входных сопротивлений. Они, в свою очередь, определяют фазу вторично излучаемого пассивными волноводами электромагнитного поля. В [1] проводится анализ антенных решеток, состоящих из плоскопараллельных волноводов. Ключевым параметром, который определяет амплитуду излучаемого пассивными волноводами поля, является величина связи по свободному пространству. В данной работе проводится анализ нового типа элемента, который может быть использован в антенных решетках, нагруженных реактивными пассивными элементами. Показывается, что при использовании данного типа волноводов как элементов антенной решетки связь по свободному пространству между элементами может регулироваться путём изменения суперэллиптичности волновода. Интеграция такого управления в алгоритм дизайна потенциально приведет к лучшему контролю диаграммы направленности.

Волноводы с суперэллиптическим поперечным сечением

Суперэллипс или кривая Ламе, – это геометрическая кривая, которая в декартовых координатах может быть описана формулой [2]

$$\left|\frac{x}{a}\right|^n + \left|\frac{y}{b}\right|^n = 1, \quad (1)$$

где n , a , b – вещественные положительные числа. Кривая, описываемая уравнением (1), ограничена прямоугольником с краями $2a$ и $2b$ и центром в начале координат. Параметр n контролирует выпуклость суперэллипса. На рис. 1 представлены примеры кривой Ламе, полученные для нескольких значений $n > 1$. Кривая, полученная для $n = 1$, – ромб, результат для $n = 2$ – эллипс, и в пределе $n \rightarrow \infty$ результатом является прямоугольник $x = 2a$ $y = 2b$. Из

рис. 1 видно, что кривая, полученная для $n = 50$, уже очень близка к этому пределу.

Рис. 1. Примеры суперэллиптической кривой для различных значений параметра n для $b = 2a$

Анализ одиночного волновода с суперэллиптическим сечением

В данном разделе проводится анализ волноводов различного сечения, работающих на основной TE_{10} -волне. Как хорошо известно, для распространения волны TE_{10} в прямоугольном волноводе его ширина должна превышать $0,5 \cdot \lambda_0$ [3], где $\lambda_0 = c/f_0$ – длина волны в свободном пространстве, выраженная через скорость света c и частоту f_0 . На рис. 2 приведен пример волновода, работающего на частоте $f_0 = 20$ ГГц с суперэллиптическим поперечным сечением, $n = 5,0$. Внутренние размеры волновода $a_{in} = 0,6 \cdot \lambda_0$ и $b_{in} = 0,1 \cdot \lambda_0$, в то время как внешние размеры равны $a_{out} = a_{in} + 0,5$ мм и $b_{out} = b_{in} + 0,5$ мм.

Рис. 2. Примеры волновода с суперэллиптическим сечением при $n = 5,0$. Справа изображена Декартова система осей, использованная для выражения электромагнитных величин

Начнём анализ рассматриваемого волновода с анализа поведения критической частоты f_c основной волны с изменением параметра суперэллиптичности n . Для этой цели будет применён числовой метод, основанный на решении уравнения дисперсии в со-

четании с методом конечного интегрирования [4]. Рассчитанные значения критической частоты, а также критическая частота второй гармоники приведены в таблице.

**Критическая частота волновода
как функция параметра n**

Параметр суперэллиптич- ности n	Критическая частота f_c первой гармо- ники, ГГц	Критическая час- тота f_c второй гармоники, ГГц
1,0	25,211	40,374
1,5	21,586	37,993
2,0	19,903	36,831
2,1	19,678	36,647
2,5	18,964	36,084
5,0	17,401	33,676
10	16,863	34,451
100	16,671	33,269
∞	16,667	33,334

Величина критической частоты прямоугольного волновода при $n \rightarrow \infty$ была рассчитана по известной формуле [5]

$$f_c^{TE_{lm}} = c \sqrt{\left(\frac{l}{2a}\right)^2 + \left(\frac{m}{2b}\right)^2}, \quad (2)$$

где l и m определяют гармонику для которой рассчитывается критическая частота.

Сравнивая результат (2) с критическими частотами, приведенными в таблице, можно прийти к выводу, что волноводы с супер-эллиптическим сечением $n \geq 10$ характеризуются критической частотой, очень близкой к величине, предсказанной формулой (2).

Это результат был ожидаем, так как для $n \geq 10$ поперечное сечение волновода можно считать прямоугольным, с закругленными углами. Из таблицы также видно, что для $n \geq n_c = 2$ критическая частота волновода ниже заданной частоты $f_0 = 20$ ГГц. С другой стороны, волноводы с суперэллиптичностью $n \leq n_c$ не поддерживают распространение TE_{10} волны и поле в них быстро затухает.

Из таблицы видно, что критическая частота второй гармоники находится достаточно далеко от рабочей частоты. Это обеспечивает достаточно большую для большинства приложений полосу частот.

На рис. 3 представлены пространственные распределения электрического поля основной волны, возбуждаемой в волноводах суперэллиптического сечения для различных значений параметра n .

Поскольку все поперечные сечения имеют схожие распределения электрического поля с максимумом в центре волновода, то можно предположить, что и излучаемые ими электромагнитные поля имеют схожие между собой пространственные распределения при возбуждении волновода основной волной.

Поведение электромагнитного поля, излучаемого открытым концом суперэллиптического волновода, может быть найдено методом, описанным в [6]. Предположим, что раскрыв волновода находится на бесконечно большой металлической пластине, лежащей в плоскости xu . В этом случае электрическое

поле, излучаемое волноводом $\mathbf{E}(r, \theta, \varphi)$, можно записать через тангенциальную составляющую распределения электрического поля на апертуре волновода $\hat{n} \times \mathbf{E}_a$:

$$\begin{aligned} E_r &= 0, \\ E_\theta &\approx \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} (N_x \cos \varphi + N_y \sin \varphi), \\ E_\varphi &\approx \frac{jk}{4\pi} \frac{e^{-jkr}}{r} \cos \theta (-N_x \sin \varphi + N_y \cos \varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

где θ и φ – углы зенита и азимута соответственно; r – радиальное расстояние; k – волновое число в свободном пространстве; η_0 – волновое сопротивление в вакууме; N_x и N_y – декартовы компоненты Фурье-преобразованного тангенциального распределения электрического поля $\mathbf{E}_a$, возбуждаемого в отверстии волновода.

$$\mathbf{N}(u, v) = \int_A \mathbf{E}_a(x', y') e^{j2\pi(ux' + vy')} dx' dy', \quad (4)$$

где

$$u = \frac{1}{\lambda} \sin \theta \cos \varphi, \quad v = \frac{1}{\lambda} \sin \theta \sin \varphi. \quad (5)$$

Рис. 3. Распределение тангенциальной составляющей электрического поля в сечении волновода при его возбуждении основной волной для различных значений параметра суперэллиптичности: $a - n = 1$; $b - n = 2$; $v - n = 100$ в сравнении с распределением электрического поля основной волны; z – волновод с прямоугольным поперечным сечением размерами $a_{in} \times b_{in}$

Используя (3), были вычислены диаграммы направленности в E - и H -плоскостях рассматриваемой излучающей структуры для различных значений параметра n (рис. 4).

Как видно из рис. 4, различия между максимальными значениями диаграмм направленности незначительны и близки к точности метода, используемого для их численного расчёта.

Рис. 4. Диаграммы направленности для различных значений параметра суперэллиптичности n : a – E -плоскость; b – H -плоскость

Как уже было замечено, основным параметром оптимизации в процедуре, описанной в [1], является электрическая длина пассивных волноводов. В свою очередь, электрическая длина волновода зависит от длины основной волны в волноводе λ_g , которая является функцией критической длины волны λ_c и длины волны генератора λ_0 [3]:

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_c}\right)^2}}. \quad (6)$$

Таким образом, важно заметить, что при проектировании реактивно-нагруженных антенных решеток, основанных на волноводах с суперэллиптическим сечением, должно учитываться изменение электрической длины волноводов из-за изменения критической длины волны при изменении сечения.

Анализ связи по свободному пространству волноводов суперэллиптического сечения

Исследование показало, что уровень связи по свободному пространству между различными вол-

новодами можно регулировать посредством соответствующего изменения суперэллиптичности сечений. Таким образом, может быть осуществлено управление амплитудой вторично излучаемых пассивными элементами решетки полей. Для анализа характеристик связи соседних суперэллиптических волноводов используется конструкция, изображенная на рис. 5. При её проектировании были использованы волноводы с указанными выше размерами. Единственное различие заключается в толщине стенок, которые были уменьшены на 0,25 мм.

Рис. 5. Два связанных волновода с суперэллиптическим поперечным сечением

Рассмотренные сечения волноводов были ограничены $n > n_c$. Таким образом, частота работы рассматриваемой конструкции ($f_0 = 20$ ГГц) заведомо находится выше критической частоты волноводов. Для того чтобы избежать неточностей в решении, которые могут возникнуть при непосредственной близости рабочей частоты волновода к его критической частоте, было применено условие $n \geq 2,1$. На рис. 6 изображен коэффициент связи S_{21} , рассчитанный на рабочей частоте f_0 как функция параметров суперэллиптичности n_1 и n_2 волноводных элементов.

Рис. 6. Коэффициент связи между двумя суперэллиптическими волноводами как функция параметров суперэллиптичности n_1 и n_2

Из рис. 6 хорошо видно, что коэффициент связи максимален для значений суперэллиптичности, близких к $n = 2$. Это связано с тем, эти значения параметров n_1 и n_2 близки к значению n_c . Этот вывод также подтверждается результатами, показанными на рис. 7, где представлено изменение коэффициента связи в зависимости от частоты при постоянном

значении $n_1 = 2,1$, при этом n_2 варьируется в диапазоне от 2,1 до 5.

Рис. 7. Коэффициент связи между двумя суперэллиптическими волноводами с параметром суперэллиптичности первого, $n_1 = 2,1$, как функция параметра суперэллиптичности второго, n_2 и рабочей частоты

Из рис. 7 видно, что коэффициент связи максимален при приближении к критической частоте f_c и уменьшается по мере увеличения рабочей частоты.

Заключение

В данной работе был проведён анализ нового класса волноводного элемента с сечением на основе уравнения Ламе, который может быть использован для проектирования реактивно-нагруженной антенной решётки. Его поведение было изучено и подробно описано. Следующим шагом в предлагаемом исследовании является разработка пассивно нагруженных антенных решёток с волноводными элементами с суперэллиптическим сечением.

Литература

1. Skobelev S.P. Phased Array Antennas with Optimized Element Patterns. – 1st ed. – Boston, USA: Artech House, 2011. – Ch. 4. – PP. 121–142.
2. Gridgeman N.T. Lamé Ovals // Math. Gaz. – 1970. – Vol. 54. – PP. 31–37.
3. Field Theory of Guided Waves. – New York, USA: IEEE Press, 1991. – Ch. 5. – PP. 329–410.
4. CST Microwave Studio 2016 // <http://www.cst.com/>
5. Pozar D.M. Microwave Engineering. – USA, John Wiley & Sons, 2012. – Ch. 3. – PP. 95–164.

6. Bird T.S. Fundamentals of Aperture Antennas and Arrays: From Theory to Design, Fabrication and Testing. – West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2016. – Ch. 3. – PP. 34–35.

Ронис Максимидис

Аспирант каф. электромагнетизма
Технологического университета Эйндховена (ТУЭ),
Нидерланды
Тел.: +31-40-247-26-47
Эл. почта: r.t.maximidis@tue.nl

Диего Карателли

Д-р техн. наук, доцент каф. компьютерных
измерительных систем и метрологии
Томского политехнического университета (НИ ТПУ),
соучредитель компании The Antenna Company,
Эйндховен, Нидерланды
Тел.: +31-40-247-26-47
Эл. почта: diego.caratelli@antennacompany.com

Джованни Тосо

Инженер-конструктор антенн
Европейского космического агентства (ЕКА), Нидерланды
Тел.: +31-40-247-26-47
Эл. почта: giovanni.toso@esa.int

Барт Смолдерс

Д-р техн. наук, профессор каф. электромагнетизма ТУЭ
Тел.: +31-40-247-26-47
Эл. почта: a.b.smolders@tue.nl

Maximidis R.T., Caratelli D., Toso G., Smolders B.A.
**Analysis of a Novel Class of Waveguiding Structures
Suitable for Reactively Loaded Antenna Array Design**

In this paper, the analysis of waveguides with super-elliptical cross-sections is carried out and their application in the design of reactively loaded antenna arrays is discussed. The advantages of using of the considered class of waveguides in order to control free-space coupling between adjacent radiating elements are shown. This provides an additional degree of freedom in the performance optimization of reactively loaded arrays.

Keywords: super-ellipse, antenna arrays, reactive loading, waveguide.