

Таким образом, оценка данных параметров иерархической составляющей информационного обеспечения системы управления энергетическими объектами позволят дополнительно оценить производительность системы в целом и повысить эффективность ее работы. Однако сложность формализации и построения комплексного критерия эффективности заставляют проектировщиков прибегать к симбиозу аналитических и эвристических методов оценки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Косенко Е.Ю.* Разработка и синтез распределенных информационно-управляющих систем: Монография. Деп. ВИНТИ №10211-5214/50 а-39.
2. *Косенко Е.Ю., Макаров С.С., Финаев В.И.* Методы моделирования и проектирования распределенных информационно-управляющих систем. – Ростов-н/Д.: Изд-во Рост. ун-та, 2004. – 203 с.
3. *Хазанович Э.С., Жабин И.К.* Определение оптимальной структуры технических средств и технологии обработки информации Экономико-математические методы. Т. 5. Вып.2.
4. *Мамиконов А.Г.* Основы построения АСУ: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1981.

Косенко Евгений Юрьевич

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kosenko@tsure.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634371689.

Евтушенко Валентин Юрьевич

E-mail: fin_val_jv@tsure.ru.

Kosenko Evgeniy Yurievich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kosenko@tsure.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371689.

Evtushenko Valentine Jurevich

E-mail: fin_val_jv@tsure.ru.

УДК 621.396

А.О. Касьянов, М.С. Китайский

**МОДЕЛЬ ПЛОСКОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ РЕШЕТКИ РЕКТЕНН,
СОСТОЯЩЕЙ ИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

На основе метода интегральных уравнений построена математическая модель решетки ректенн из комбинированных (продольных и поперечных) микрополосковых излучателей. В модели адекватно учитывается фидерная система решетки и управляющие элементы в виде пространственных МПП и импедансных итырей.

Ректенна, комбинированный излучатель; приподнятый микрополосковый элемент; микрополосковый пространственный переход; математическое моделирование; система интегральных уравнений.

A.O. Kasyanov, M.S. Kitaiskiy

THE FULL-WAVE MODEL OF PLANE MICROSTRIP RECTENNA ARRAY OF COMBINED PRINTED RADIATORS

Full-wave solution of electromagnetic problem about lumped excitation microstrip reflectarray with longitudinal and transversal printed radiators has been obtained. Novelty of the offered mathematical model consists in the adequate description of a stripline feeder influence on characteristics of the microstrip array.

Rectenna, combined radiator; raised microstrip element; microstrip spatial transition; mathematical modeling; system of integral equations.

В последнее время в связи с широким использованием мобильных систем связи большой интерес вызывает исследование микрополосковых антенн (МПА), нагруженных на нелинейные элементы, – ректенн. Микрополосковые антенны, интегрированные с нелинейными элементами, выступают в качестве приемных устройств портативных широкополосных систем связи. Обычные микрополосковые антенные решетки уже давно применяются в таких системах. Однако в отличие от них решетки ректенн позволяют суммировать сигналы от каждого из детекторов на низких или промежуточных частотах, что существенно упрощает технологию конструирования и изготовления приемного устройства, уменьшая при этом габариты антенной системы и ее стоимость. Объединение ректенн в решетки приводит к увеличению чувствительности антенной системы, что в свою очередь дает возможность работать в расширенном динамическом диапазоне. Кроме того, можно с легкостью осуществлять прием сигналов на решетку ректенн с различных направлений, аналогично многолучевому приемнику. В настоящей работе рассматривается возможность использования в качестве антенных элементов ректенн комбинированных микрополосковых (МП) излучателей. Комбинированный МП излучатель представляет собой микрополосковый элемент (МПЭ) произвольной формы, расположенный на высоте d над идеально проводящим экраном параллельно ему. Исключение из конструкции микрополосковой антенны подложки дает возможность работать в существенно более широкой полосе частот с более высокими уровнями мощности, что приводит к повышению эффективности антенны, из-за отсутствия потерь в материале неидеального диэлектрика [1–3]. Описываемый МПЭ соединяется с экраном посредством широкого пространственного МП перехода (МПП) произвольной формы наклоненного к экрану. В слое «виртуальной подложки» располагаются импедансные штыри, шунтирующие МПЭ на экран. С их помощью можно промоделировать не только элемент крепления МПЭ, но и управляющие элементы СВЧ, подключенные к печатному излучателю, а также учесть и оценить влияние импедансных включений, появляющихся при объединении антенного элемента и нелинейной нагрузки.

Описываемая электродинамическая структура совместима с широко используемыми в волноводной технике конструктивными методами согласования и ей не присуща дисперсия в достаточно широкой полосе частот, поскольку она поддерживает T – волну. Указанные достоинства позволяют применять МПА с подвешенными пластинами в качестве антенных элементов ректенных решеток удовлетворяющих критерию широкополосности.

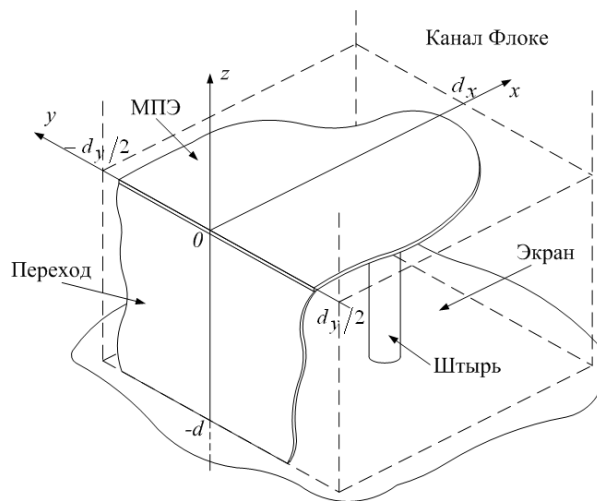


Рис. 1. Структура единичной ячейки решетки ректени

При анализе описанного выше комбинированного излучателя, изображенного на рис. 1, использовалась математическая модель, построенная на основе метода интегральных уравнений.

Элементы решетки возбуждаются плоской электромагнитной волной (ЭМВ) произвольной поляризации. Необходимо определить распределение поверхностной плотности магнитного тока на свободной от микрополосковых элементов поверхности решетки, а через нее рассчитать рассеянное решеткой поле.

Решение сформулированной граничной задачи производится методом интегральных уравнений электродинамики на основании леммы Лоренца, удовлетворяя граничным условиям о непрерывности касательных составляющих полей на границе раздела областей V_1 ($z > 0$) и V_2 ($-d < z < 0$):

$$E_{1x}(q \in S_0) = E_{2x}(q \in S_0) = E_x|_{S_0}; H_{1x}(p \in S_0) = H_{2x}(p \in S_0) = H_x|_{S_0};$$

$$E_{1y}(q \in S_0) = E_{2y}(q \in S_0) = E_y|_{S_0}; H_{1y}(p \in S_0) = H_{2y}(p \in S_0) = H_y|_{S_0};$$

граничным условиям (ГУ) на поверхности пространственного МПП

$$[\mathbf{n}_2, \mathbf{E}_2] = 0,$$

а также импедансным ГУ на поверхностях штырей (5):

$$[\mathbf{E}_2, \mathbf{n}_2] = Z[\mathbf{n}_2, [\mathbf{n}_2, \mathbf{H}_2]].$$

В приближении идеальной проводимости МПЭ можно предположить, что как продольный, так и поперечный его участки имеют бесконечно малую толщину. После применения теоремы Флоке получим систему из двух скалярных интегральных уравнений относительно компонент касательных составляющих векторов поверхностных электрических и магнитных токов на элементах конструкции единичной ячейки микрополосковой ОАР комбинированных излучателей: апертуре – J_x^M и J_y^M ; пространственном МПП – $J_{2y}^{\mathcal{E}}$ и $J_{2z}^{\mathcal{E}}$; импедансом штыря – $J_{2zi}^{\mathcal{E}}$.

$$\begin{aligned}
 & \int_{S_A} \left\{ J_x^M(q)K_{11}(q,p) + J_y^M(q)K_{12}(q,p) \right\} dS'_A - \int_{S_{III}} J_{2zu}^{\circ}(q)K_{13}(q,p) dS'_{III} + \\
 & + 2 \int_{S_{II}} \left[J_{2x}^{\circ}(q)K_{14}(q,p) + J_{2z}^{\circ}(q)K_{15}(q,p) \right] dS'_{II} = -\bar{\xi} \tilde{H}_1^{M6}(q^0, p), \\
 & \int_{S_A} \left\{ J_x^M(q)K_{21}(q,p) + J_y^M(q)K_{22}(q,p) \right\} dS'_A - \int_{S_{III}} J_{2zu}^{\circ}(q)K_{23}(q,p) dS'_{III} + \\
 & + 2 \int_{S_{II}} \left[J_{2x}^{\circ}(q)K_{24}(q,p) + J_{2z}^{\circ}(q)K_{25}(q,p) \right] dS'_{II} = -\bar{\xi} \tilde{H}_1^{M6}(q^0, p), \\
 & \int_{S_A} \left\{ J_x^M(q)K_{31}(q,p) + J_y^M(q)K_{32}(q,p) \right\} dS'_A - \int_{S_{III}} J_{2zu}^{\circ}(q)K_{33}(q,p) dS'_{III} + \\
 & + 2 \int_{S_{II}} \left[J_{2x}^{\circ}(q)K_{34}(q,p) + J_{2z}^{\circ}(q)K_{35}(q,p) \right] dS'_{II} = 0, \\
 & \int_{S_A} \left\{ J_x^M(q)K_{41}(q,p) + J_y^M(q)K_{42}(q,p) \right\} dS'_A - \int_{S_{III}} J_{2zu}^{\circ}(q)K_{43}(q,p) dS'_{III} + \\
 & + 2 \int_{S_{II}} \left[J_{2x}^{\circ}(q)K_{44}(q,p) + J_{2z}^{\circ}(q)K_{45}(q,p) \right] dS'_{II} = 0, \\
 & \int_{S_A} \left\{ J_x^M(q)K_{51}(q,p) + J_y^M(q)K_{52}(q,p) \right\} dS'_A - \int_{S_{III}} J_{2zu}^{\circ}(q)K_{53}(q,p) dS'_{III} + \\
 & + 2 \int_{S_{II}} \left[J_{2x}^{\circ}(q)K_{54}(q,p) + J_{2z}^{\circ}(q)K_{55}(q,p) \right] dS'_{II} = ZJ_{2zu}^{\circ}(q).
 \end{aligned}$$

Таким образом, полученные интегральные уравнения образуют полную систему скалярных ИУ относительно компонент поверхностной плотности магнитного тока апертуры: J_x^M , J_y^M , электрического тока пространственного МПП: J_{2y}° , J_{2z}° и электрического тока импедансного штыря J_{2zu}° . Эти неизвестные компоненты позволяют определить рассеянное решеткой поле. В приведенных интегральных выражениях под $K_{ii}(q,p)$ обозначены ядра интегральных уравнений, выражения для которых не приводятся из-за их громоздкости.

В подавляющем числе случаев системы интегральных уравнений не имеют аналитического решения и допускают только численное решение. Полученная выше система ИУ не является исключением. Методика приближенного численного решения последней заключается в сведении ее к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), для реализации которой используется метод моментов [4]. С этой целью сначала выберем базисные и пробные функции для представления распределений искомых токов.

В общем случае выбор системы базисных функций произволен. Однако выбирая базис, учитывающий особенности поведения искомых функций, можно получить более точное решение с меньшим числом функций, чем в случае базиса, не учитывающего этих особенностей. Поэтому для каждой искомой функции выберем

систему базисных функций, удовлетворяющую граничным условиям соответствующей искомой функции распределения тока на границе ее области определения. Ввиду того, что рассматриваемая система интегральных уравнений составлена относительно неизвестных функций, определенных на разнородных поверхностях, единственной универсальной функцией, которая интегрируется в замкнутой форме со всеми ядрами, является дельта-функция Дирака. Поэтому в качестве пробной функции выберем дельта-функцию, а в качестве базисных функций выберем функции подобластей, удовлетворяющие граничным условиям для соответствующих искомым функций.

Для искомым компонент поверхностной плотности магнитного тока апертуры: J_x^M , J_y^M , а также компонент электрического тока пространственного МПП:

J_{2y}^E , J_{2z}^E выберем базис в виде треугольных призм. Для электрического тока импедансного штыря $J_{2zш}^E$ выберем кусочно-треугольный базис.

Подставляя разложения искомым токов по базисным функциям в интегральные уравнения системы и выбирая в качестве пробных функций: дельта-функции, определенные в точках, являющихся центрами базисных функций, получаем СЛАУ относительно комплексных амплитуд базисных функций распределений компонент векторов искомым токов на конструктивных элементах единичной ячейки решетки ректенн. В общем виде систему можно записать как произведение обобщенной матрицы, составленной из взаимных импедансов $\langle \mathbf{Z} \rangle$ и адмитансов $\langle \mathbf{Y} \rangle$ подсекций разбиения конструктивных элементов единичной ячейки, на вектор-столбец, составленный из комплексных амплитуд базисных функций искомым электрических токов пространственного МПП и штырей – \mathbf{I}^E , а также и магнитных токов апертуры – \mathbf{I}^M . Результат произведения есть вектор-столбец, составленный из комплексных амплитуд напряжений $\mathbf{U}^{\text{пад}}$ и токов $\mathbf{I}^{\text{пад}}$, описывающих поле ЭМВ возбуждающей решетку ректенн. Матрица коэффициентов СЛАУ является квадратной и имеет порядок, равный числу неизвестных коэффициентов разложения искомым функций. Полученные выражения для элементов матрицы коэффициентов СЛАУ позволяют провести численное моделирование описанной выше модели микрополосковой решетки ректенн на основе комбинированных переизлучателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
2. Herscovici, N. A wide-band single-layer patch antenna. – IEEE Transactions on antennas and propagation, 1998. Vol. 46. № 4. – P. 471-473.
3. Лось В.Ф. Микрополосковые и диэлектрические резонаторные антенны. САПР модели: методы математического моделирования / Под ред. Л.Д. Бахраха. – М.: ИПРЖР, 2002. – 96 с.
4. Численные методы теории дифракции: Сб. статей. Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 200 с.

Касьянов Александр Олегович

Технологический институт федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге.

E-mail: kasao@mail.ru.

347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44.

Тел.: 88634388844.

Кафедра антенн и радиопередающих устройств; доцент.

Китайский Максим Сергеевич

E-mail: kitaiskii_maksim@mail.ru.

Тел.: 88634389358.

Кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Kasyanov Alexander Olegovich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kasao@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634388844.

The Department of Antennas and Radio Transmitters; associate professor.

Kitaiskiy Maxim Sergeevich

Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”.

E-mail: kitaiskii_maksim@mail.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634389358.

The Department of Antennas and Radio Transmitters; postgraduate student.