

он не ограничен ни способом разбиения системы, ни численными методами дальнейшего решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений. В то же время он позволяет упростить задачу за счет декомпозиции, что очень важно для моделирования сложных систем.

Если рассматривать данный подход применительно к энергосистемам, то можно заметить, что в большинстве случаев сложные энергообъекты представляют собой модульную структуру, что существенно упрощает задачу декомпозиции системы, а их многосвязность и взаимовлияние можно учесть используя метод совместных релаксаций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lyashev V.A., Reznikov V.B., Zolotovskiy V.E.* Modeling Environment for Complex Multicomponent Engineering Systems // Proc. of int. conf. "Information approach in the natural, humanitarian and engineering sciences". Part#3. – Taganrog: "Anton", 2004. – P.53-56.
2. *Zein D.* Solution of a set of nonlinear algebraic equations for general purpose CAD programs. - Circuit analysis, simulation and design, ed. by Ruehli A.E., North Holland, 1986.
3. *Dmitriev-Zdorov V.B., Klaassen B.* An improved relaxation approach for mixed system analysis with several simulation tools. - Proc. of European Design Autom. Conf., EURO-DAC'95. Brighton, UK, 1995. – P. 274-279.
4. *Bellen A., Zennaro M.*, Numerical methods for delay differential equations. Numerical Mathematics and Scientific Computation, Oxford Science Publications. Oxford University Press. – Oxford, 2003.

#### **Ляшев Владимир Александрович**

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

E-mail: Lyashev@tti.sfedu.ru.

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

Тел.: 88634371632.

Кафедра теоретических основ радиотехники; доцент.

#### **Lyashev Vladimir Alexandrovich**

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

E-mail: Lyashev@tti.sfedu.ru.

44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia.

Phone: 88634371632.

The Department of Fundamentals of Radio Engineering; associate professor.

УДК 621.396

**А.О. Касьянов, М.С. Китайский**

### **РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОСКОЙ РЕКТЕННОЙ РЕШЕТКИ ПЕЧАТНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*В статье приводятся результаты тестирования алгоритма для расчета характеристик рассеяния полей от комбинированных микрополосковых излучателей находящихся в составе решетки. Полученные в ходе численного моделирования результаты, свидетельствуют об адекватности разработанной математической модели.*

*Комбинированный излучатель; численное исследование; импеданс; коэффициент отражения; фазовая характеристика.*

A.O. Kasyanov, M.S. Kitaiskiy

**THE NUMERICAL RESEARCH RESULTS OF PRINTING FLAT RECTENNA  
ARRAY OF COMBINED ELEMENTS**

*In article results of testing of algorithm for calculation of scattering behaviors from the combined microstrip radiators being in array are resulted. The results received during numerical modeling, confirm to adequacy of the developed mathematical model.*

*The combined radiator; numerical research; an impedance; reflexion coefficient; the phase characteristic.*

На основе разработанной математической модели, позволяющей анализировать микрополосковые (МП) излучатели, находящиеся в составе решеток, можно провести численный эксперимент по исследованию комбинированных излучателей. Однако прежде чем перейти непосредственно к самому моделированию, необходимо произвести тестирование разработанного алгоритма. Для тестирования рассмотрим конструкцию переизлучателя, топология единичной ячейки которой изображена на рис. 1. На рис. 1 заштрихованный прямоугольник обозначает микрополосковый элемент (МПЭ), к которому подключены два короткозамыкателя, шунтирующие прямоугольный МПЭ на экран. Один из короткозамыкателей представляет собой короткозамыкающий штырь, а другой – проводящую ленту такой же точно ширины, как и прямоугольный МП элемент. В этом случае короткозамыкающая лента выполняет функцию пространственно перехода. Проводящий экран расположен на расстоянии  $h=1$  мм под плоскостью расположения МПЭ. Размер ячейки Флоке определяется размерами  $dx=2,37$  мм и  $dy=0,2$  мм соответственно. Зазор в апертуре вдоль узкой стороны канала Флоке остается постоянным и равным  $\Delta 2=0,02$  мм, а вдоль длинной стороны ( $\Delta 1$ ) принимает фиксированные значения.

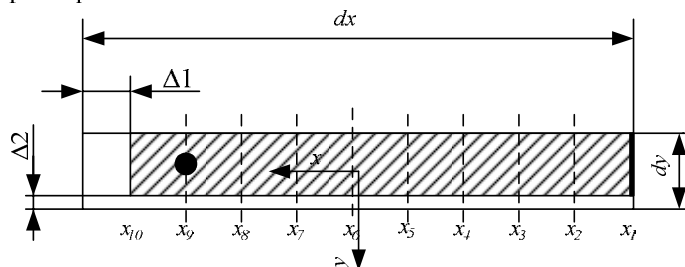


Рис. 1. Топология единичной ячейки канала Флоке

Местоположение короткозамыкающего пространственного перехода остается неизменным, а место включения штыря определяется координатами –  $x_i$ . Таким способом можно промоделировать работу фазовращателя на  $p$ - $i$ - $n$ -диодах. В этом случае диоды будут подключаться в точках с координатами, характеризующими место включения короткозамыкающего штыря. Следует отметить, что в общем случае импеданс штыря может иметь комплексный характер. Введение в состав комбинированного переизлучателя импедансных штырей позволяет промоделировать работу управляющих приборов СВЧ.

На рис. 2 приведены фазовые характеристики коэффициента отражения (КО) электромагнитной волны (ЭМВ) на согласованной поляризации с падающим на решетку полем, рассчитанные на частоте 30 ГГц. Зависимости рассчитаны при следующих параметрах:  $\Delta 1=0,02$  мм,  $x_i \in [x_1, x_7]$  – кривая 1,  $\Delta 1=0,04$  мм,  $x_i \in [x_1, x_8]$  –

кривая 2,  $\Delta l = 0,06$  мм,  $x_i \in [x_1, x_9]$  – кривая 3,  $\Delta l = 0,1$  мм,  $x_i \in [x_1, x_{10}]$  – кривая 4. Им-педанс штыря полагался нулевым ( $Z=0$ ).

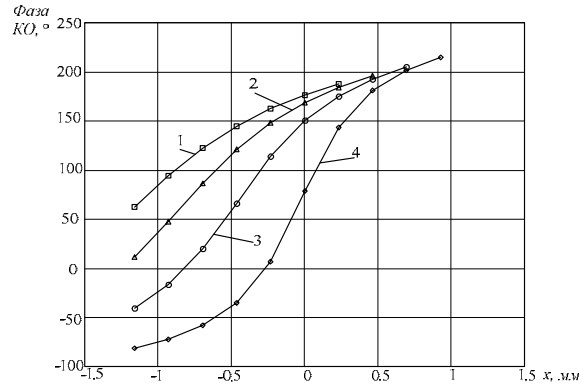


Рис. 2. Фазовые характеристики комбинированного переизлучателя

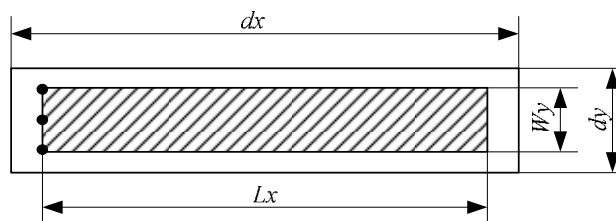


Рис. 3. Топология единичной ячейки канала Флоке

Описываемая топология МП излучателя обладает рядом свойств, о которых следует упомянуть. Использование пространственного МП перехода приводит к уменьшению геометрических размеров переизлучающих элементов. Это в свою очередь позволяет располагать их более компактно, т.е. ближе друг к другу. При этом уменьшаются размеры самой антенной системы в целом, что является важным фактором при миниатюризации антенных устройств. В результате для антенных решеток с уменьшенным межэлементным расстоянием оказывается возможным осуществление сканирования диаграммой направленности в расширенном секторе углов. Кроме того уменьшение геометрических размеров микрополосковых излучающих элементов приводит к уменьшению числа используемых управляемых элементов, что напрямую ведет к уменьшению числа цепей управления, а как следствие уменьшению энергопотребления и стоимости таких устройств.

Приведенные численные результаты полностью совпали с данными, представленными в [1], что свидетельствует о достоверности полученных результатов. На основании достоверности полученных зависимостей, свидетельствующих об адекватности разработанной математической модели, был проведен численный тест-эксперимент по исследованию влияния форм-фактора МПЭ на фазу коэффициента отражения.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования для единичной ячейки отражательной антенной решетки, топология которой представлена на рис. 3. Конструктивно микрополосковый комбинированный переизлучатель включает в себя поперечный МП излучатель (МПИ), представляющий собой прямо-

угольную проводящую пластинку с размерами узкой стороны равной  $W_y=1,5$  мм и варьируемой от 1,5 мм до 7,5 мм длиной большей стороны  $L_x$ . Данный МПЭ поддерживается над проводящим экраном на высоте  $h=1$  мм. В качестве опор поддерживающих этот переизлучатель используются либо три цилиндрических проводящих штыря, либо три проводящих пластинки, замыкающие МПИ с одной из его узких сторон. При этом для случая, когда выполняется соотношение из [2],  $a=2d$ , где  $d$  – диаметр проводящего штыря,  $a$  – ширина пластинки, полученные зависимости для коэффициента отражения совпадают с графической точностью. Ширина короткозамыкающих пластин составляет 0,1 от ширины МПИ. Периоды канала Флоке устанавливались равными 2 мм и 10 мм. Расчеты проводились на частотах равных 10, 12 и 14 ГГц. Как видно из приведенных зависимостей при увеличении частоты происходит смещение фазовой характеристики влево, т.е. в коротковолновую область, что соответствует уменьшению резонансных размеров МПИ.

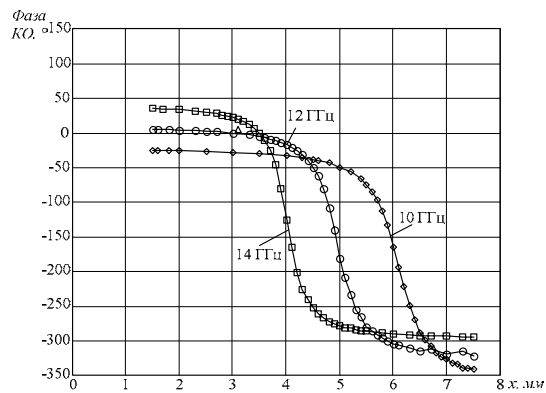


Рис. 4. Фазовые характеристики комбинированного переизлучателя

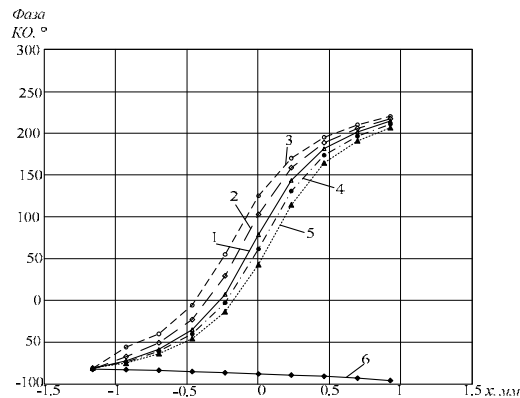


Рис. 5. Влияние импеданса шунтирующего штыря на фазу коэффициента отражения

Также было проведено тестирование разработанного алгоритма с целью подтверждения адекватного учета в математической модели импедансных включений, моделирующих управляемые короткозамыкатели, для топологии, изображенной на рис. 1. Результаты этого тестирования приведены на рис. 5. На этом рисунке кривая под номером 1 характеризуется нулевым импедансом ( $Z=0$ ). Для кривой, обозначенной под номером 6, импеданс штыря имел чисто активный характер и составлял

125 Ом ( $X=0$ ). При этом, как видно из графика, изменение фазы коэффициента отражения составляет чуть менее  $10^\circ$ . Фактически это означает то, что электромагнитная волна при заданном сопротивлении штыря «не замечает» его присутствия, т.е. штырь, практически не оказывает влияния на работу МП переизлучателя. Таким образом, можно говорить о том, что штыри с большим активным сопротивлением могут рассматриваться как несущие конструктивные элементы, выполняющие функцию опор, держателей, вставок и т.п. На рис. 3 кривые, обозначенные под номерами 2 и 3, соответствуют чисто емкостному импедансу штыря ( $R=0$ ), значения которого приняты 1,25 Ом и 2,5 Ом соответственно. Кривые 4 и 5 представляют зависимость фазы КО от положения штыря, имеющий численно такие же значения реактанса, но характер последнего уже чисто индуктивный. Как видно из графиков, включение в состав МП переизлучателя обладающего емкостным сопротивлением приводит к небольшому расширению, а также к смещению фазовой характеристики влево, что соответствует смещению резонансной частоты колебательного контура в коротковолновую область. При использовании индуктивной нагрузки фазовая характеристика сдвигается вправо, что соответствует смещению резонансной частоты колебательного контура в длинноволновую область.

На основе проведенных тестовых вычислений, выполненных с помощью построенной математической модели плоской решетки комбинированных излучателей, можно с уверенностью сказать, что разработанная математическая модель является надежным инструментом при исследовании, анализе и проектировании широкого класса электродинамических структур и устройств.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Обуховец В.А., Касьянов А.О.* Микрополосковые отражательные антенные решетки. Методы проектирования и численное моделирование: Монография / Под ред. В.А. Обуховца. – М.: Радиотехника, 2006. – 240 с.
2. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 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**

E-mail: kitaiskii\_maksim@mail.ru.

Phone: 88634389358.

The Department of Antennas and Radio Transmitters; post-graduate student.