

А. И. ЛУЧАНИНОВ, д-р. физ.-мат. наук, А. А. КОНОВАЛЬЦЕВ, канд. техн. наук,  
Ю. А. ЛУЧАНИНОВ, М. А. ОМАРОВ, канд. техн. наук, В. М. ШОКАЛО, д-р. техн. наук

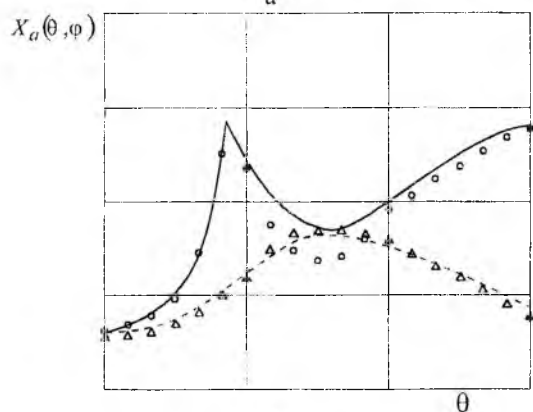
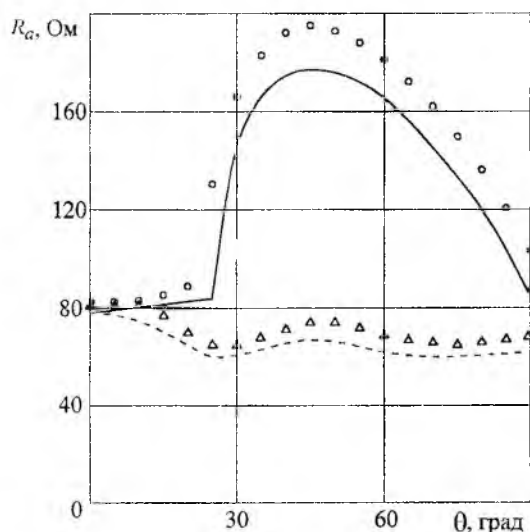
## АЛГОРИТМ АНАЛИЗА ЭКВИДИСТАНТНОЙ РЕШЕТКИ ЛЕНТОЧНЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ, АДАПТИРОВАННЫЙ К РАСЧЕТУ КРУПНОАПЕРТУРНЫХ АНТЕНН С НЕЛИНЕЙНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ТЕСТОВЫХ ЗАДАЧ

#### 8. Результаты тестирования комплекта прикладных программ

Описанный в работах [1-3] алгоритм внедрен в комплект прикладных программ (КПП) для анализа электродинамических характеристик периодических структур линейных излучателей. Для оценки его достоверности и эффективности выполнен ряд тестовых расчетов, результаты которых сравнивались с данными, приведенными в работах других авторов.

В качестве простейшего тестового примера рассматривался расчет входного сопротивления симметричных проволочных вибраторов в составе бесконечной антенной решетки (АР), расположенной в свободном пространстве над экраном. На рис. 1 показаны зависимости величин активной и реактивной составляющих входного сопротивления от направления фазирования АР (сплошная линия – в плоскости  $E$ , штриховая – в плоскости  $H$ ), приведенные в работе [4] для решетки, которая характеризуется следующим геометрическими параметрами:  $d_p = 0,5\lambda$ ,  $d_q = 0,5\lambda$ ,  $\alpha_r = 90^\circ$ ,  $h = 0,5\lambda$ ,  $l = 0,5\lambda$ , где  $h$  – высота расположения ее элементов над экраном,  $l$  – длина плеч вибраторов. Соответственно кружочками и треугольниками отмечены значения аналогичных параметров, определенные с использованием разработанного комплекта прикладных программ.



б  
Рис. 1

Как видно из рис. 1, характер изменения рассматриваемых зависимостей оказывается идентичным. При количественной оценке расхождения результатов, не превышающей 5%, следует учитывать различие моделей, используемых для расчета характеристик исследуемых АР. Например, при пересчете радиуса вибраторов в эквивалентную ширину ленточного проводника и вычислении функции Грина свободного пространства по полученным рекуррентным соотношениям для случая двухслойной подложки в качестве материальных параметров слоев которой задавались соответствующие параметры свободного пространства.

В качестве другого тестового примера решалась задача о коэффициенте отражения бесконечной решетки симметричных печатных вибраторов, расположенных на слое диэлектрика над экраном. На рис. 2, а показаны приведенные в работе [5] зависимости модуля коэффициента отражения от угла падения возбуждающей плоской волны в  $E$  и  $H$  плоскостях (соответственно сплошная и штриховая линии) решетки вибраторов с длиной плеч  $l = 0,19\lambda$ , расположенных в узлах периодической сетки с прямоугольной формой ячейки с размерами  $d_p = 0,5\lambda$  и  $d_q = 0,5\lambda$  на немагнитной подложке без потерь толщиной  $h = 0,26\lambda$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 2,55$ . Данные, полученные на основе разработанного КПП, отмечены на соответствующих графиках кружочками и треугольниками.

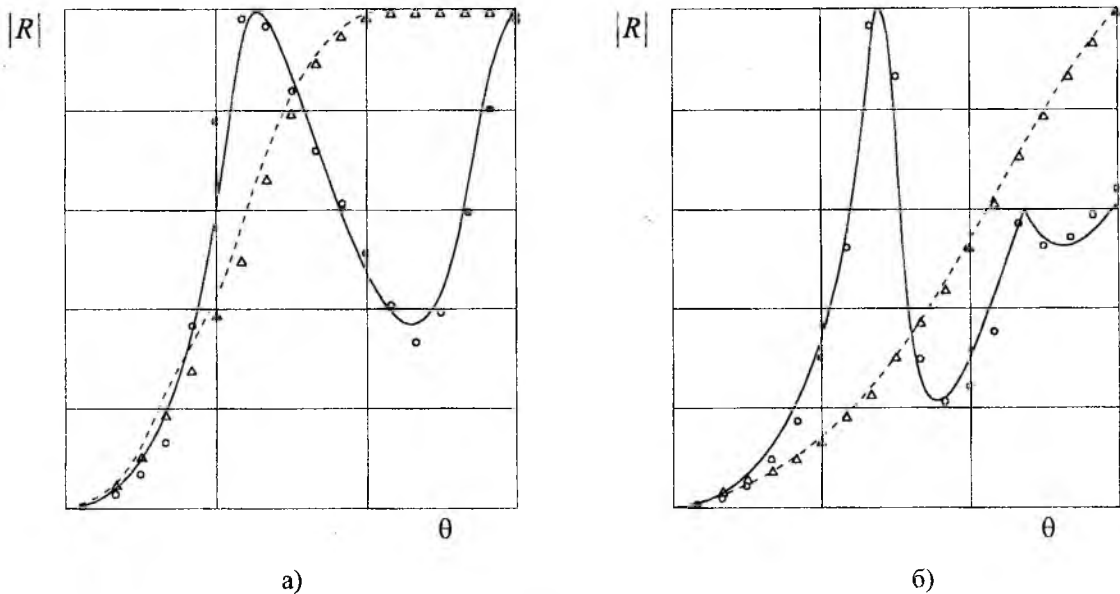


Рис. 2

На рис. 2, б приведены аналогичные зависимости для АР с другими геометрическими параметрами:  $d_p = 0,5155\lambda$ ,  $d_q = 0,5\lambda$ ,  $\alpha_r = 60^\circ$ ,  $h = 0,19\lambda$ ,  $\epsilon = 2,55$ ,  $l = 0,195\lambda$ . Кроме того, в табл. 1 приведены значения входного сопротивления вибраторов в составе АР, геометрия которых описана выше, при условии возбуждения их плоской волной, приходящей с направления  $\theta_0 = \varphi_0 = 0^\circ$  свободного пространства. Анализ приведенных данных показывает, что результаты расчета относительных параметров (коэффициента отражения) практически совпадают с данными работы [5], а погрешность вычисления абсолютных величин (входного сопротивления) не превышает 3 %.

Таблица 1

Номер АР	$Z_{вх}$ (данные [6])	$Z_{вх}$ (расчет)
1	$11 + 2j$	$10,61 - 3,21j$
2	$73 + 4j$	$69,18 - 1,29j$

Для оценки достоверности алгоритма при решении задач анализа АР сложной геометрии использовались данные работы [7], в которой рассматривается АР малогабаритных свернутых вибраторов, расположенных в свободном пространстве над экраном. Значения входных сопротивлений элементов такой решетки, приведенные в [7] и полученные на основе разработанного КПП, отличаются на 3-5%.

Проверка функционирования алгоритма при расчете характеристик периодических структур, содержащих проводники, непрерывные вдоль апертуры, осуществлялась путем вычисления амплитудно-фазового распределения тока в решетках, геометрия ячеек периодичности которых показана на рис. 3 и 4. В табл. 2 приведены значения амплитуд и фаз тока в структуре сеточного типа (рис. 3) при нормальном падении на нее плоской волны для случаев «горизонтальной» (вдоль проводника  $A - E$ ) и «вертикальной» (вдоль проводника  $F - P$ ) поляризации вектора  $\vec{E}$ . Из приведенных в таблице данных видно, что при размере ячейки  $\lambda/2$  сдвиг фаз в точках, соответствующих пересечению проводника границей ячеек периодичности, составляет величину  $\pi$ . При повороте плоскости поляризации волны на  $90^\circ$  распределение тока, имеющее место в первом случае на участке  $A - E$ , устанавливается на участке  $F - P$  и наоборот. Заметим, что для точки  $C$  приведены три значения коэффициентов разложения тока в заданном базисе, соответствующие трем БФ, аппроксимирующим ток в точке соединения четырех ветвей (направления элементарных токов показано на рисунке стрелками).

При анализе периодической АР, содержащей зигзагообразные проводники, находилось распределение тока для случаев нормального падения плоской волны, направление вектора  $\vec{E}$  которой совпадает с направлениями осей периодичности  $p$  и  $q$  решетки или составляет угол  $45^\circ$  с осью  $p$  (соответственно «горизонтальная», «вертикальная» или «диагональная» поляризация). Рассматривалось несколько вариантов определения границ ячейки периодичности (рис. 4, а и 4, б). Данные указанных расчетов приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 2

	«Горизонтальная» поляризация		«Вертикальная» поляризация	
	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$
A	0,73743	15	0,0	-165
B	0,73743	-165	0,0	15
C <sub>1</sub>	0,0	15	0,73743	15
C <sub>2</sub>	0,0	15	0,0	-165
C <sub>3</sub>	0,73743	-165	0,0	15
D	0,73743	-165	0,0	15
E	0,73743	-165	0,0	15
F	0,0	15	0,73743	15
G	0,0	-165	0,73743	-165
H	0,0	15	0,73743	-165
P	0,0	-165	0,73743	-165

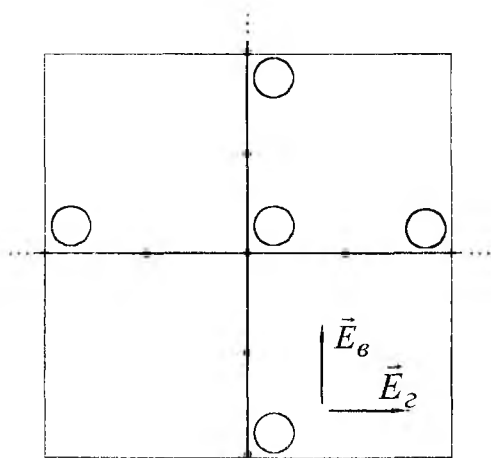
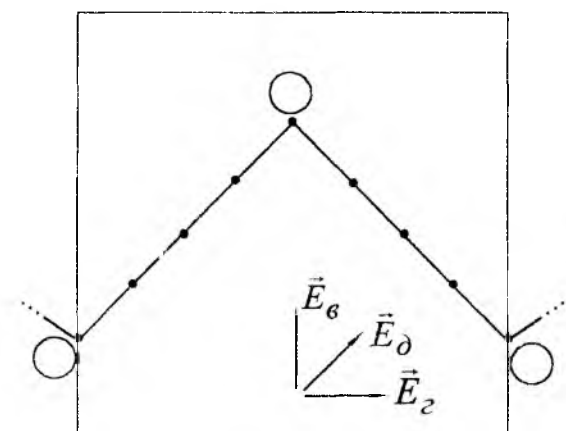
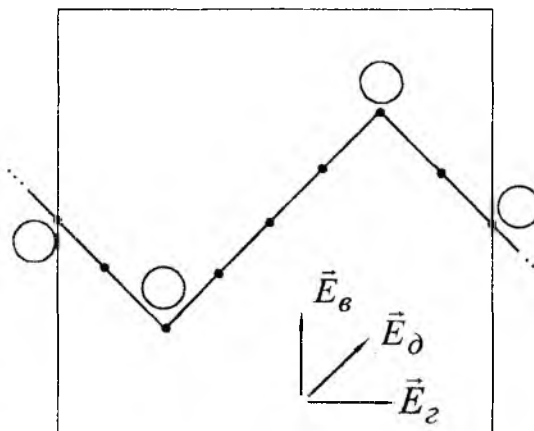


Рис. 3



а)



б)

Рис. 4

Таблица 3

	«Горизонтальная» поляризация		«Диагональная» поляризация		«Вертикальная» поляризация	
	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$
A	0,59939	12	0,42383	12	0,0	-168
B	0,61767	-168	0,82187	-178	0,56323	12
C	0,62604	-168	0,96495	-180	0,76028	12
D	0,61767	-168	0,82187	-178	0,56323	12
E	0,59939	-168	0,42383	-168	0,0	12
F	0,61767	-168	0,15259	-103	0,56323	12
G	0,62604	-168	0,19708	-60	0,76028	12
H	0,61767	-168	0,15259	-103	0,56323	12
P	0,59939	-168	0,42383	-168	0,0	12

Таблица 4

	«Горизонтальная» поляризация		«Диагональная» поляризация		«Вертикальная» поляризация	
	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$	$ I $ , мА	$\varphi_A^\circ$
A	0,62604	12	0,19708	12	0,76028	-168
B	0,61767	-168	0,15259	-103	0,56323	12
C	0,59939	-168	0,42383	-168	0,0	12
D	0,61767	-168	0,82187	-178	0,56323	12
E	0,62604	-168	0,96495	-180	0,76028	12
F	0,61767	-168	0,82187	-178	0,56323	12
G	0,59939	-168	0,42383	-168	0,0	12
H	0,61767	-168	0,15259	-103	0,56323	12
P	0,62604	-168	0,19708	-168	0,76028	12

Таким образом, приведенные результаты тестирования разработанного КПП позволяют сделать вывод о его достоверности при решении целого ряда частных задач. В качестве оценки его эффективности могут быть приведены следующие данные. Время расчета входного сопротивления излучателя, расположенного на поверхности однослойного диэлектрика над экраном, на ЭВМ типа IBM PC/Pentium – 200 не превышает нескольких минут, если ток аппроксимируется пятью БФ, а в суммах (2), (8) и (9) [3] учитывается по 30 слагаемых. В табл. 6 приведены данные, позволяющие оценить выигрыш во времени вычислений характеристик АР на сетке направлений прихода возбуждающей плоской волны при использовании предложенной методики вычисления элементов матрицы импедансов в методе Галеркина, а также данные о влиянии выбора границы частичного суммирования на точность получаемых результатов.

В табл. 5 приняты следующие обозначения:  $Z_{ow} = (\Delta Z/Z_0)100\%$ ,  $t_B = t/t_0$ . В первом варианте  $Z_0 = 1,1511 - i1,859$ ,  $t_0 = 3$  мин, во втором  $Z_0 = 5,1217 - i1,3756$ ,  $t_0 = 3$  мин. Вычисления выполнялись для случая короткого диполя, на котором определена одна БФ тока. Диполь располагается на слое диэлектрика под однослойным укрытием. В первом варианте предполагается ромбическая, а во втором – прямоугольная ячейка периодичности.

Одним из достоинств разработанного КПП является модульный принцип построения программы, позволяющий расширять ее возможности без изменения существующей структуры путем подключения новых блоков и программ.

Таким образом, предложенная методика и реализующий ее КПП являются достаточно эффективным инструментом анализа крупноапертурных периодических решеток линейных излучателей в широком диапазоне частот при помощи ЭВМ средней производительности.

### Выводы

Основные результаты проведенных авторами исследований по созданию алгоритма анализа электродинамических характеристик периодических ленточных МПА сложной геометрии сводятся к следующему.

1. Создана модель излучающей структуры антенной решетки как бесконечной периодической структуры с многослойной диэлектрической подложкой и произвольной конфигурацией излучателей ленточного типа.

2. Исследованы возможности повышения эффективности (с точки зрения быстродействия) расчета электродинамических характеристик бесконечных периодических решеток линейных излучателей произвольной конфигурации и создание соответствующего алгоритма, ориентированного на ЭВМ средней производительности.

3. Получены аналитические выражения для определения элементов матрицы обобщенных импедансов в методе моментов. Разработан способ приближенного вычисления последних для случая, когда характеристики антенн определяются в зависимости от направления прихода возбуждающей плоской волны.

4. Разработан комплект прикладных программ для расчета многослойных полосковых антенных решеток. Проведено тестирование КПП, которое показало, что погрешность определения входных сопротивлений не превышает 1...5%.

5. Показано, что использование модульного принципа и рациональное построение КПП допускает его совершенствование по мере расширения круга решаемых задач и развития средств вычислительной техники.

**Список литературы:** 1. Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 1. Модель, описание геометрии и система интегральных уравнений для токов ленточных микрополосковых излучателей сложной геометрии в составе бесконечной решетки / В.М. Шокало, А.И. Лучанинов, А.А. Коновальцев, Ю.А. Лучанинов, М.А. Омаров // Радиотехника. 2001. Вып. 117. С. 78-84. 2. Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 2. Решение системы интегральных уравнений / В.М. Шокало, А.И. Лучанинов, А.А. Коновальцев, Ю.А. Лучанинов, М.А. Омаров // Радиотехника. 2001. Вып. 118. С. 3-7. 3. Алгоритм анализа эквидистантной решетки ленточных микрополосковых излучателей произвольной геометрии, адаптированный к расчету крупноапертурных антенн с нелинейными элементами. 3. Особенности численной реализации алгоритма / В.М. Шокало, А.И. Лучанинов, А.А. Коновальцев, Ю.А. Лучанинов, М.А. Омаров // Радиотехника. 2001. Вып. 119. С. 199-210. 4. Сканирующие антенные системы СВЧ. Т.2 / Под ред. Хансена Р. М.: Сов. радио, 1969. 496 с. 5. Pozar D.M., Schaubert D.H. Scan blindness in infinite phased arrays of printed dipoles // IEEE Trans. Antennas and Propag. 1984. Vol.32, No.6. PP. 602-610. 6. Das N.K., Pozar D.M. A generalized spectral-domain Green's function for multilayer dielectric substrates with application to multilayer transmission lines // IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 1987. Vol. 35. PP. 326-335. 7. Бодров В.В., Володина И.В. Математическая модель для проектирования малогабаритных свернутых излучателей для ФАР// Автоматизированное проектирование устройств СВЧ. 1988. С. 69-75.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 11.12.2000