

DOI 10.24412/2221-2574-2022-1-62-69

УДК 621.396.67

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАДИОПРОЗРАЧНОГО ОБТЕКАТЕЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Гаврилов Валериан Михайлович

кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых¹.

Никитин Олег Рафаилович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»¹.

Смирнов Данила Сергеевич

аспирант кафедры радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых¹, ведущий инженер отдела радиотехники ФГУП «ГНПП «Крона»².

E-mail: dansmirnovich@gmail.com

¹Адрес: 600000, Российская Федерация, г. Владимир, ул. Горького, д. 87.

²Адрес: 600036, Российская Федерация, г. Владимир, проспект Ленина, д. 73.

Аннотация: В настоящей работе путём компьютерного моделирования метода конечного фрагмента исследуются его точностные характеристики при оценке влияния радиопрозрачного обтекателя на характеристики многоэлементной радиотехнической системы из плоско-параллельных волноводов при сканировании. Для дифференцированной оценки влияния ошибок разработана компьютерная программа математической модели ограниченного фрагмента радиотехнической системы. Проведена оценка влияния размерности фрагмента радиотехнической системы на точность моделируемых характеристик многоэлементных систем, в том числе в составе радиопрозрачного обтекателя. Рассмотрена возможность применения асимптотических закономерностей для экстраполяции коэффициентов взаимной связи фрагмента радиотехнической системы с малым числом элементов на фрагмент большой размерности. Выработаны рекомендации по выбору размеров фрагмента для получения оптимальной точности моделируемых характеристик многоэлементных радиотехнических систем, в том числе в составе радиопрозрачного обтекателя.

Ключевые слова: метод конечного фрагмента, многоэлементная радиотехническая система, радиопрозрачный обтекатель, коэффициент взаимной связи, коэффициент отражения, угол сканирования.

Актуальные радиотехнические системы (РТС) должны проектироваться с учётом внешних воздействий, которые в значительной степени определяют их надёжность и работоспособность. В эксплуатационных условиях такие системы подвергаются разнообразным влияниям окружающей среды (обледенения, перепадов температуры, влажности, солёных брызг, ветра), которые могут значительно ухудшить их характеристики [1]. В настоящее время используются, и предполагается широкое применение радиопрозрачных обтекателей (РПО), которые предназначены для защиты РТС от негативных климатических факторов [2]. Вы-

сокие требования к радиотехническим параметрам, к способности сохранять их при неблагоприятных воздействиях окружающей среды, приводят к необходимости предварительного исследования РПО. Компьютерное моделирование РПО сопряжено с использованием дорогостоящих программных и аппаратных средств. Стоит отметить, что разработать компьютерную модель, полностью совпадающую с реальной конструкцией, не всегда представляется возможным. Поэтому целесообразно использовать для решения этой важной задачи методы физического моделирования РПО. В настоящее время в силу простоты ре-

лизации и технологичности, при выполнении измерений разработчики РПО предпочитают использование метода конечного фрагмента (МКФ) [3], [4]. Метод предназначен для исследования многоэлементных РТС и может успешно применяться для исследования РПО и его влияния на характеристики системы. Важнейшей задачей при разработке РПО является решение радиотехнических вопросов, в частности, достижения необходимой радиопрозрачности обтекателя и минимального искажения характеристик системы.

Эти задачи должны решаться в широком диапазоне частот и различных секторах сканирования.

На современном этапе метод остается недостаточно исследованным, несмотря на распространённость МКФ у разработчиков РПО. В частности, не установлено влияние размерности фрагмента РТС, погрешности измерений и технологических допусков на точность моделируемых характеристик многоэлементных РТС с РПО [5], [6].

В настоящей работе путём компьютерного моделирования МКФ исследуются его точностные характеристики при оценке влияния радиопрозрачного обтекателя в виде вставок на характеристики многоэлементной РТС из плоско-параллельных волноводов при сканировании.

Для дифференцированной оценки влияния ошибок разработана компьютерная программа математической модели ограниченного фрагмента РТС. Следующие рассуждения поясняют реализацию математической модели.

Блок-матрица рассеяния $[S_{11}]$ – матрица коэффициентов взаимной связи (КВС) между элементами бесконечной периодической РТС, может быть определена с помощью спектрального разложения [7], [8]:

$$[S_{11}] = [T] \{ \Gamma(\psi) \} [T^*]^T, \quad (1)$$

где $\{ \Gamma(\psi) \}$ — диагональная матрица собственных значений, соответствующих величине действующего коэффициента отражения (КО) на входе элементов бесконечной РТС при из-

менении угла сканирования ψ ; $[T]$ — модальная матрица бесконечной периодической РТС:

$$[T] = \frac{1}{2\pi} [\exp(jn\psi)], \quad (2)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ — соответствует номерам элементов РТС; $-\pi \leq \psi \leq \pi$ — угол сканирования бесконечной линейной РТС.

Непосредственным обращением (1) можно получить соотношение:

$$\{ \Gamma(\psi) \} = [T^*]^{-1} [S_{11}] [T] \quad (3)$$

Матричные уравнения (1) и (3) связывают матрицу рассеяния по входам элементов бесконечной РТС — матрицу КВС, с действующим КО [9].

Алгоритм осуществления математической модели ограниченного фрагмента РТС включает два основных этапа. В ходе первого – для конкретного типа бесконечной РТС по известной зависимости $\{ \Gamma(\psi) \}$ с помощью соотношений (1) и (2) вычисляется матрица $[S_{11}]$. Для ограниченного фрагмента бесконечной РТС матрица рассеяния определяется соответствующим блоком элементов матрицы $[S_{11}]$, размерность которого равна числу элементов на фрагменте. Второй этап предполагает восстановление зависимости $\{ \Gamma(\psi) \}$ по матрице рассеяния ограниченного фрагмента РТС с помощью соотношения (3).

Важным свойством матрицы КВС $[S_{11}]$ является априорно известный характер асимптотического поведения КВС от номера и положения удалённых элементов. В асимптотической области зависимость модуля КВС от положения элементов в логарифмическом масштабе близка к прямой, тангенс угла наклона которой равен $-3/2$: $|S_n| \sim (nD)^{-3/2}$, где D — шаг линейной РТС, а разность фаз смежных элементов близка к величине $\Delta Arg(S_n) \sim kD$, определяемой скоростью распространения волн в свободном пространстве [9].

Это свойство матрицы КВС использовалось при экстраполяции КВС ограниченного фрагмента РТС на многоэлементную систему с требуемым числом элементов [10].

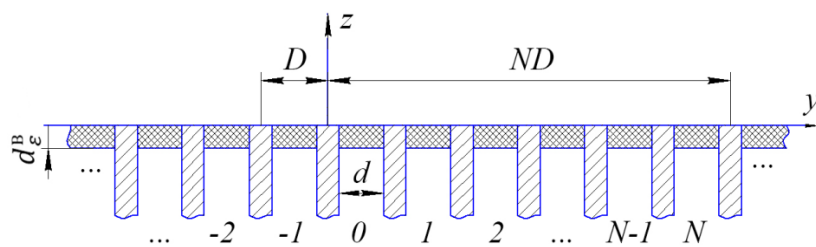


Рис. 1. Ограниченный фрагмент РТС из плоских волноводов

Алгоритм реализован для компьютерной модели ограниченного фрагмента РТС из плоских волноводов (рис. 1), где $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Электродинамический расчёт зависимостей $\{\Gamma(\psi)\}$ выполнялся комбинированным методом с помощью разработанных ранее программ [12].

При вычислении матрицы $[S_{11}]$ с помощью выражения (1) использовалась методика дискретного преобразования Фурье (ДПФ), реализованная на компьютере процедурой быстрого преобразования Фурье.

Процедурная погрешность расчёта элементов матрицы $[S_{11}]$ для ДПФ с размерностью 1024 на уровне -60 дБ не превышала $\pm 0,5$ дБ по модулю и $\pm 20^\circ$ по фазе [12]. Расчёт восста-

новленной зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$ с помощью соотношения (3), выполненный по ограниченной матрице $[S_{11}]$, учитывающей элементы до 100-го включительно, для многоэлементных РТС простой конфигурации сопровождался погрешностью, которая не превышала 0,0002 по модулю и $0,02^\circ$ по фазе относительно исходной зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$ для бесконечных РТС.

Анализ влияния конечного числа элементов. Анализ выполнен без учёта краевого эффекта для фрагмента РТС из плоских волноводов при сканировании в Е-плоскости, в которой известны особенности зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$ имеют более выраженный характер. Сравнительная оценка проводилась с характеристиками РТС, включающей 100 элементов.

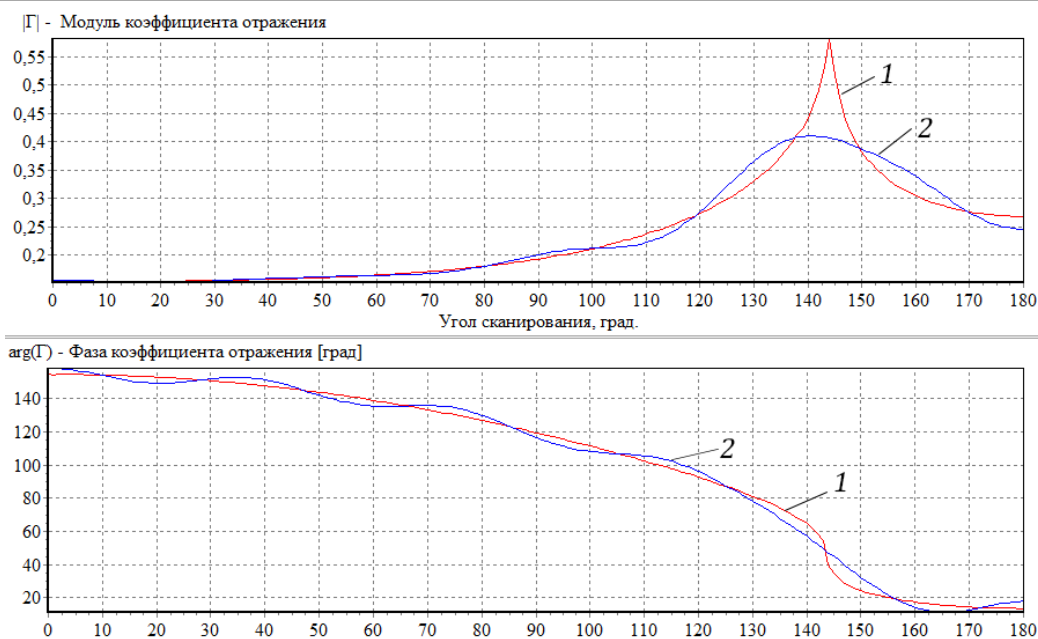


Рис. 2. Зависимости КО от угла сканирования в Е-плоскости ($D = 0,6\lambda$, $d = 0,45\lambda$); (1 – многоэлементная РТС; 2 – зависимость, восстановленная по 10 КВС)

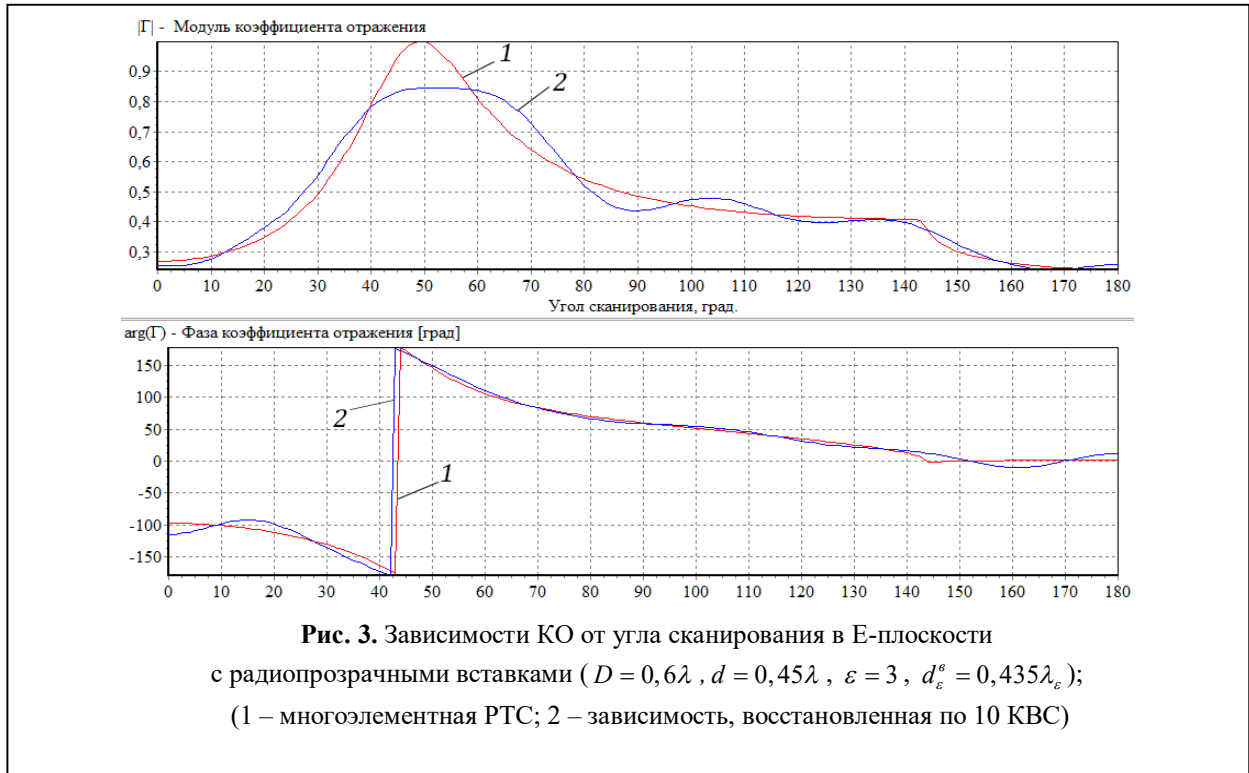


Рис. 3. Зависимости КО от угла сканирования в Е-плоскости с радиопрозрачными вставками ($D = 0,6\lambda$, $d = 0,45\lambda$, $\epsilon = 3$, $d_\epsilon^e = 0,435\lambda_\epsilon$); (1 – многоэлементная РТС; 2 – зависимость, восстановленная по 10 КВС)

На рис. 2 приведена зависимость действующего КО от угла сканирования $\{\Gamma(\psi)\}$ для фрагмента из плоских волноводов простой конфигурации ($D = 0,6\lambda$, $d = 0,45\lambda$), восстановленная по 10 КВС. На рис. 3 показаны аналогичные зависимости соответственно для фрагмента с радиопрозрачными вставками в раскрые.

В таблице 1 приведены значения максимальной погрешности, полученной при анализе зависимостей $\{\Gamma(\psi)\}$ для фрагментов РТС указанных конфигураций, восстановленных по 10, 20, 50 КВС.

Исследования показали, что с помощью малоэлементных фрагментов с размерностью элементов по координате не больше 10 можно удовлетворительно восстановить зависимость

$\{\Gamma(\psi)\}$ многоэлементной РТС на плавно меняющихся участках. В области характерных особенностей для удовлетворительного описания требуемое число элементов возрастает до 30...50, в зависимости от конкретной конфигурации фрагмента РТС (таблица 1). Ниже рассмотрена возможность применения асимптотических закономерностей для экстраполяции КВС фрагмента с малым числом элементов на фрагмент большой размерности.

На рис. 4, 5 приведены зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$, восстановленные по матрице КВС, образованной экстраполяцией КВС ограниченного фрагмента на 100-элементную РТС.

В таблице 2 приведены значения максимальной погрешности, полученные при анализе зависимостей $\{\Gamma(\psi)\}$ для фрагментов указанных конфигураций, восстановленных по 3,

Таблица 1

	N	$D = 0,6\lambda$, $d = 0,45\lambda$	$D = 0,6\lambda$, $d = 0,45\lambda$, $\epsilon = 3$, $d_\epsilon^e = 0,435\lambda_\epsilon$
$\frac{\Delta \Gamma(\psi) }{\Delta Arg\Gamma(\psi)}$	10	0,17549/11,47413 ⁰	0,15526/353,92657 ⁰
	20	0,11540/7,60231 ⁰	0,03249/5,55754 ⁰
	50	0,05895/4,4816 ⁰	0,01717/3,07298 ⁰

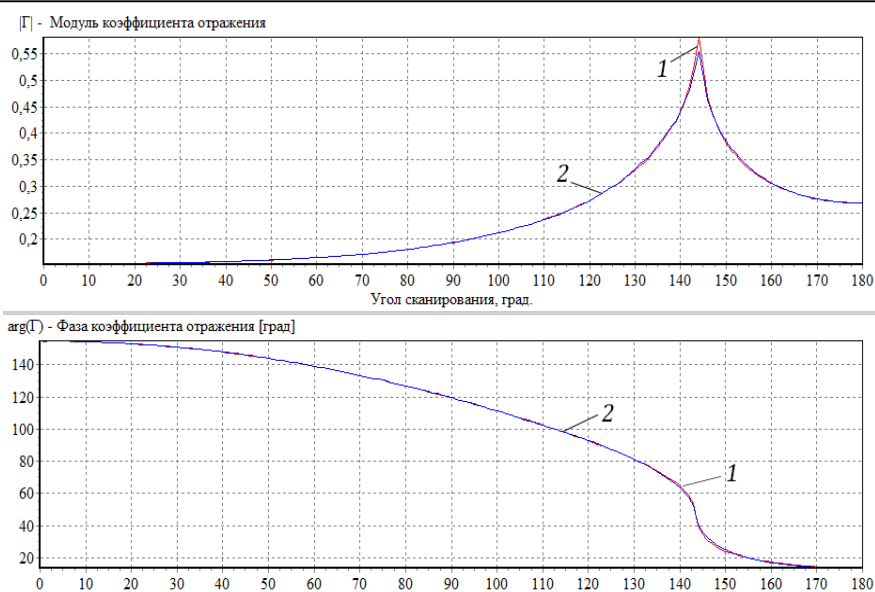


Рис. 4. Зависимости КО от угла сканирования в Е-плоскости ($D = 0,6\lambda$, $d = 0,45\lambda$); (1 — многоэлементная РТС; 2 — зависимость, восстановленная по 10 КВС с экстраполяцией)

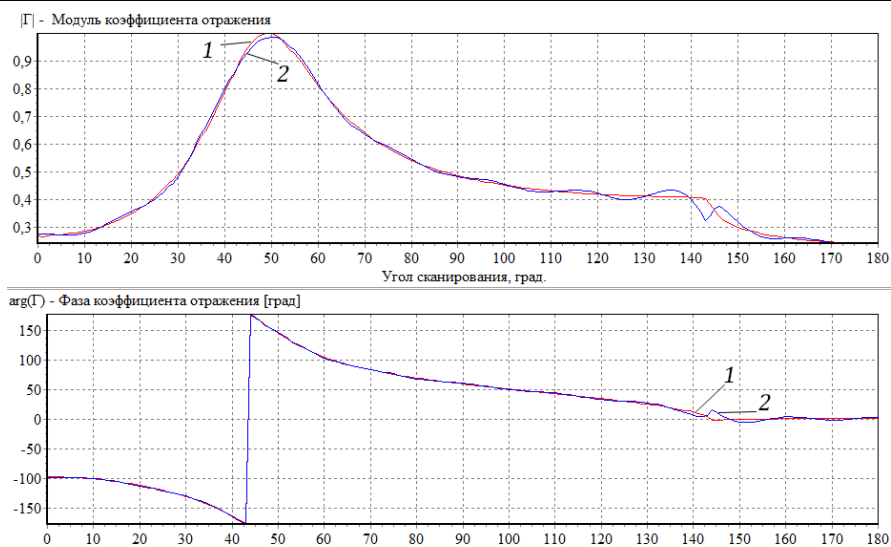


Рис. 5. Зависимости КО от угла сканирования в Е-плоскости с радиопрозрачными вставками ($D = 0,6\lambda$, $d = 0,45\lambda$, $\varepsilon = 3$, $d_\varepsilon^e = 0,435\lambda_\varepsilon$); (1 — многоэлементная РТС; 2 — зависимость, восстановленная по 20 КВС с экстраполяцией)

5, 10, 20 и 50 КВС с последующей экстраполяцией.

Из рис. 4, 5 и таблицы 2 следует, что для фрагмента простой конфигурации (без радиопрозрачных вставок), максимальная погрешность зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$ восстановленной по матрице КВС фрагмента с 10-ю элементами и последующей экстраполяцией равно 0,0267 по

модулю и $1,622^\circ$ по фазе. Для фрагмента сложной конфигурации (с радиопрозрачными вставками) погрешности: 0,0024 по модулю и $0,342^\circ$ по фазе, достигаются с числом элементов на фрагменте равным 50. В случае сложной конфигурации число элементов на фрагменте, обеспечивающее требуемую точность моделирования, зависит от графической сложности

Таблица 2

	N	$D = 0,6\lambda, d = 0,45\lambda$	N	$D = 0,6\lambda, d = 0,45\lambda,$ $\varepsilon = 3, d_\varepsilon^e = 0,435\lambda_\varepsilon$
$\frac{\Delta \Gamma(\psi) }{\Delta Arg\Gamma(\psi)}$	3	0,12407/6,97859 ⁰	10	0,55739/353,2445 ⁰
	5	0,06671/4,10971 ⁰	20	0,09611/18,64948 ⁰
	10	0,02672/1,62177 ⁰	50	0,00242/0,34206 ⁰

зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$, которая связана с размерами радиопрозрачных вставок и их электродинамическими параметрами.

Сравнивая результаты, приведенные в таблицах 1 и 2, можно отметить увеличение максимальной погрешности моделируемой зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$ для РТС с радиопрозрачными вставками при экстраполяции КВС фрагмента с числом элементов меньше 40. В указанных случаях это объясняется существенным отличием зависимостей КВС (по модулю и разности аргументов) для близко расположенных элементов от асимптотических зависимостей. На фрагменте с радиопрозрачными вставками КВС для элементов с номерами до 40...50 носят по модулю и разности фаз быстро убывающий и сложно осциллирующий характер. Попытка заменить на этом участке реальные зависимости асимптотическими приводит к заметному искажению параметров КВС и, как следствие, к увеличению погрешности восстановленной зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$.

Представленные результаты позволяют сделать следующее заключение. Для РТС простой конфигурации, не включающих радиопрозрачных вставок, оптимальным можно считать фрагмент, включающий 10 элементов по одной координате. С помощью асимптотических соотношений измеренную на фрагменте матрицу КВС можно экстраполировать на многоэлементную РТС. При этом для 100-элементного фрагмента РТС погрешность восстановленной зависимости коэффициента отражения от угла сканирования $\{\Gamma(\psi)\}$, включающей особенности, характерные для сканирования в Е-плоскости, в рассмотренных примерах не превышала 0,027 по модулю и 1,63⁰ по фазе. На фрагментах сложной конфигура-

ции (с радиопрозрачными вставками), для качественного описания зависимости $\{\Gamma(\psi)\}$ с характерными для системы сложной конфигурации особенностями, можно ограничиться использованием фрагмента с числом элементов по одной координате равным 20. В этом случае, как следует из рассмотренных примеров, максимальная погрешность $\{\Gamma(\psi)\}$ находится в пределах 0,033 по модулю и 5,557⁰ по фазе. Применение асимптотических закономерностей позволяет существенно снизить максимальную погрешность, которая при экстраполяции 50 КВС на 100-элементную РТС, составила 0,003 по модулю и 0,35⁰ по фазе. Из-за сложного характера зависимости КВС для близко расположенных элементов РТС применение асимптотических зависимостей для элементов матрицы КВС в этом случае оказывается эффективным для фрагмента с размерностью по одной координате порядка 50.

Литература

1. Каплун В.А. Обтекатели антенн СВЧ (радиотехнический расчёт и проектирование). М.: Советское радио, 1974. 240 с.
2. Красюк В.Н. Антенны СВЧ с диэлектрическими покрытиями (особенности расчёта и проектирования). Л.: Судостроение, 1986. 164 с.
3. Гаврилов В.М. Моделирование характеристик ФАР с помощью многоэлементного волноводного имитатора // Антенны. 2004. № 6. С. 13–16.
4. Гаврилов В.М. Анализ ошибок волноводного моделирования ФАР // Антенны. 2005. № 3. С. 3–6.
5. Diamond B.L. Small arrays – Their analysis and their use for the design of array elements // PAA Symposium Digest. 1970. Pp. 52–55.
6. Виниченко Ю.П., Леманский А.А., Митяшев М.Б. К расчёту конечных антенных решеток // Радиотехника и электроника. 1980. № 7. С. 1397–1404.

7. Steyskal H. Mutual coupling analysis of finite planar waveguide array // IEEE Transactions. 1974. Vol. AP-22. Pp. 594–597.

8. Сазонов Д.М. Основы матричной теории антенных решеток. Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. М.: Высшая школа. № 6. 1983. С. 111–162.

9. Сазонов Д.М. Многоэлементные антенные системы. Матричный подход. Монография. М.: Радиотехника. 2015. 144 с.

10. Амтей Н., Галиндо В., Ву Ч. Теория и анализ фазированных антенных решеток: пер. с англ. М.: Мир. 1974. 455 с.

11. Мишустин Б.А., Щербаков В.И., Фролов Н.Я. К вопросу об асимптотике взаимной связи элементов АР // XXXI Всесоюзная научная сессия НТОР и Э им. А.С. Попова. М.: Советское радио. 1976. С. 65–66.

12. Гаврилов В.М. Расчет фазированной антенной решетки комбинированным методом // Антенны. 2004. № 6. С. 3–8.

Поступила 5 октября 2021 г.

English

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A RADIO-TRANSPARENT FAIRING ON THE CHARACTERISTICS OF MULTI-ELEMENT RADIO ENGINEERING SYSTEMS

Valerian Mihailovich Gavrilov — PhD, the Professor of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹.

Oleg Rafailovich Nikitin — Grand Dr. in Engineering, the Head of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹.

Danila Sergeevich Smirnov — the Postgraduate Student of Department of Radio Engineering and Radio Systems, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs”¹; the Leading Engineer of the Radio Engineering Department of FSUE “GNPP “Krona”².

E-mail: dansmirnovich@gmail.com

¹Address: 600000, Russian Federation, Vladimir, Gorky St., 87.

²Address: 600036, Russian Federation, Vladimir, Lenina Ave., 73.

Abstract: In this paper, by computer simulation of the finite fragment method, its accuracy characteristics are investigated when evaluating the effect of a radio-transparent fairing on the characteristics of a multi-element radio engineering system of plane-parallel waveguides during scanning. For a differentiated assessment of the impact of errors, a computer program for a mathematical model of a limited fragment of a radio engineering system has been developed. The influence of the dimension of a fragment of a radio engineering system on the accuracy of the simulated characteristics of multi-element systems, including as part of a radio-transparent fairing, has been evaluated. The possibility of applying asymptotic regularities to extrapolate the coefficients of mutual coupling of a fragment of a radio engineering system with a small number of elements to a fragment of a large dimension is considered. Recommendations have been developed on the choice of fragment sizes to obtain optimal accuracy of the simulated characteristics of multi-element radio engineering systems, including as part of a radio-transparent fairing.

Keywords: finite fragment method, multi-element radio system, radiotransparent plugs, coupling coefficient, reflection coefficient, scanning angle.

References

1. Kaplun V.A. UHF antenna radomes (radiotechnical calculation and design). Moscow: Sovetskoe Radio, 1974. 240 p.

2. Krasnyuk V.N. UHF antennas with dielectric surfaces (calculation and design features). Leningrad: Sudostroenie, 1986. 164 p.

3. Gavrilov V.M. Modeling PAA characteristics with multielement waveguide imitator. Antenny. 2004. No. 6. Pp. 13–16.

4. Gavrilov V.M. Analysis of waveguide imitator modeling errors. Antenny. 2005. No. 3. Pp. 3–6.

5. *Diamond B.L.* Small arrays – Their analysis and their use for the design of array elements. PAA Symposium Digest. 1970. Pp. 52–55.
6. *Vinichenko Y.P., Lemanskij A.A., Mityashev M.B.* To the calculation of finite antenna arrays. Radiotekhnika i elektronika. 1980. No. 7. Pp. 1397–1404.
7. *Steyskal H.* Mutual coupling analysis of finite planar waveguide array. IEEE Transactions. 1974. Vol. AP-22. Pp. 594–597.
8. *Sazonov D.M.* Fundamentals of the matrix theory of antenna arrays / D.M. Sazonov // Collection of scientific and methodological articles on applied electrodynamics. Moscow: Vysshaya shkola. No. 6. 1983. Pp. 111–162.
9. *Sazonov D.M.* Multielement antenna systems. Matrix Approach. Monograph. Moscow: Radiotekhnika. 2015. 144 p.
10. *Amitej N., Galindo V., Vu C.* Theory and analysis of phased antenna arrays. Moscow: Mir. 1974. 455 p.
11. *Mishustin B.A., Shcherbakov V.I., Frolov N.Y.* On the question of the asymptotics of the mutual coupling of array elements. XXXI All–Union scientific session NTOR named after A.S. Popov. Moscow: Sovetskoe radio. 1976. Pp. 65–66.
12. *Gavrilov V.M.* Phased array combine calculation method. Antenny. 2004. No. 6. Pp. 3–8.