

УДК 621.396.67.01

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ И МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ

А. В. Богословский, к.т.н., заместитель начальника кафедры радиоэлектроники ВУНЦ ВВС «ВВА», Воронеж, Россия;
orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

С использованием программного комплекса электродинамического моделирования CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio оценены рассеивающие свойства диэлектрических и металлизированных объектов с осевой симметрией. В интересах исследования диаграмм рассеяния при различных видах пространственного распределения комплексных диэлектрических проницаемостей отражательных поверхностей выполнено моделирование вторичного электромагнитного излучения цилиндрами конечной длины с регулярным радиусом поперечного сечения при частичной и полной металлизации боковых поверхностей.

Распределение поверхностных токов на цилиндре находилось методом конечных элементов FEM – Finite Element Method. Расчет поляризационных компонентов поля и диаграммы рассеяния цилиндра осуществлялся при активации встроенного в структуру программы CST MWS вычислителя Frequency Domain Solver, обеспечивающего определение координат аппроксимирующей сетки с различным видом ячеек.

В зонах дискретизации комплексные амплитуды токов находились методом моментов MoM – Method of Moments при частичном обращении операторов краевых задач.

Из полученных результатов следует, что максимумы диаграмм рассеяния цилиндров с идеально проводящими полосами на боковых поверхностях сосредоточены в секторах пространства, противоположных области металлизации. Показано, что в секторе углов шириной 60° диаграммы рассеяния цилиндров равных электрических размеров с полной и частичной металлизацией близки по форме.

Цель работы состоит в исследовании закономерностей вторичного электромагнитного излучения диэлектрических объектов с различными степенями металлизации поверхностей.

Ключевые слова: объект с осевой симметрией, рассеяние электромагнитных волн, диаграмма рассеяния, программа электродинамического моделирования, краевая задача электродинамики.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-19-26

Введение

Объекты с осевой симметрией являются базовыми компонентами антенно-мачтовых опор и антенных систем вибраторного типа. Диэлектрические и металлизированные тела вращения по форме совпадают с фрагментами поверхностей носителей (в частности, фюзеляжей летательных аппаратов) для размещения внешних целевых нагрузок [1, 2].

Анализ рассеяния электромагнитных волн такими объектами имеет значение для определения рационального технического облика приемно-передающих структур в интересах обеспечения электромагнитной совместимости компактно размещенных радиоэлектронных средств, функционирующих в общих диапазонах частот и секторах пространства, и несущих конструкций в соответствии с требованиями к маневренным свойствам и радиолокационной заметности мобильных радиотехнических комплексов [1, 3]. Рассеивающие свойства приемно-передающих и несущих поверхностей устанавливают предельные возможности компоновки на площадях ограниченных размеров и обуславливают экранирование рабочих зон радиоэлектронной аппаратуры [4, 5]. Электромагнитные связи в радиотехнических комплексах усложняют распределение пространственно-частотного ресурса и являются причинами фор-

мирования дифракционных пространственно-коррелированных помех [6, 7], усложняющих процедуры формирования и обработки сигналов.

Эффективные способы анализа характеристик вторичного электромагнитного излучения основаны на электродинамическом моделировании, суть которого заключается в установлении закономерностей формирования вторичного электромагнитного поля по распределению токов, наводимых облучающей волной, путем постановки и решения краевых задач электродинамики при граничных условиях на отражающей поверхности [2, 3].

Согласно [2, 3, 8], аналитические методы электродинамического моделирования позволяют исследовать рассеяние электромагнитных волн объектами простой формы с однородными электрофизическими свойствами и электрическими размерами, превышающими границу квазиоптической области [2]. Анализ резонансного рассеяния полей телами вращения с диэлектрическими свойствами и частичной металлизацией поверхностей выполняется на основе численного решения краевых задач электродинамики в частных областях, принимая во внимание то, что пространственное распределение диэлектрических проницаемостей постоянно. [1]. Полное электрическое поле определяется методом композиции [2] путем сложения полей отдельных участков объектов при сшивании функций токов на границах [1, 3].

В предлагаемой работе проведен анализ диаграмм рассеяния цилиндров конечной длины с регулярным радиусом поперечного сечения при частичной и полной металлизации боковых поверхностей на основе вычислительных экспериментов с применением программного пакета электродинамического моделирования CST MWS [9].

Цель работы – исследование закономерностей вторичного электромагнитного излучения диэлектрических объектов с различными степенями металлизации поверхностей.

Применение программ электродинамического моделирования для анализа характеристик рассеяния объектов с осевой симметрией

В работе электродинамическое моделирование осуществлялось с помощью программного пакета CST MWS, на основе прямых численных методов, реализованных в нем, таких как, метод конечных элементов FEM – Finite Elements Method, метод моментов MoM – Method of Moments, метод геометрической оптики GOM – Geometry Optics Method, метод физической оптики POM – Physical Optics Method, многоуровневый метод быстрых мультиполей MLFMM – Multilevel Fast Multipole Method, метод конечных разностей по временной области FDTD – Finite Difference Time Domain Method, метод обобщенной теории дифракции UTDM – Uniform Theory of Diffraction Method, а также гибридных методов расчета.

Решение трехмерных краевых задач электродинамики в комплексе компьютерного моделирования проводилось с использованием подпрограммы Frequency Domain Solver, представляющей собой частотный вычислитель, работа которого базируется на методе конечных элементов FEM [7].

Метод FEM эффективно применяется при решении краевых задач с источниками возбуждающего поля, заключенными в замкнутые области; в частности, при электродинамическом анализе излучения и рассеяния электромагнитных волн цилиндрической поверхностью [7, 10]. Дискретизация поверхности цилиндров осуществлялась треугольными, гексагональными и тетрагональными элементами. Их форма и количество выбирались из условий минимизации количества отсчетов с поддержанием заданной точности аппроксимации поверхностных токов. Распределение поверхностных токов и расчет характеристик рассеяния выполнялись на фиксированных частотах. Граничные условия на идеально проводящей поверхности определялись равенством тангенциальных составляющих полного электрического поля. На границе раздела сред контролировались условия непрерывности тангенциальных компонентов напряженности электрического и магнитного полей. С учетом осевой симметрии цилиндра составляющие электрического и магнитного полей представлялись в виде бесконечных рядов Фурье по азимутальным гармоникам [8, 9]. В результате применения граничных условий для представления электрического и магнитного полей формировалась замкнутая система уравнений [8, 11].

На основе метода моментов MOM и с применением методов геометрической GOM и физической оптики POM, а также быстрого мультипольного метода MLFMM решены краевые задачи возбуждения поверхностных токов фрагментов объектов [6, 7].

При решении интегро-дифференциальных уравнений, определяющих математическую постановку задачи возбуждения объекта, использовался метод конечных разностей в частотной (временной) области FDF(T)D – Finite Difference in Frequency (Time) Domain. С учетом аналитических свойств искомых поверхностных токов строилась сетка, для каждого узла которой с использованием разностных схем вычисления производных [9] формировалось разностное уравнение для комплексных амплитуд токов в точках дискретизации поверхности объекта. Отличительной особенностью используемого метода при решении краевой задачи является замена операций дифференцирования пространственно-временного (пространственного) распределения токов и полей разностными схемами.

При использовании метода конечных интегралов в частотной (временной) области FITF(T)D – Finite Integration Technique in Frequency (Time) Domain выполнялась дискретизация операторных уравнений краевых задач с использованием центрально-разностных приближений частных производных по пространству и времени [6, 7]. В результате формировались конечно-разностные линейные уравнения с корнями, определяющими дискретное множество комплексных амплитуд токов в узлах сетки.

Результаты оценки рассеивающих свойств цилиндров

На основе комплекса моделирования высокочастотных устройств типа CST MWS проведены расчет и последующий анализ моноэлектрических диаграмм и эффективных площадей рассеяния цилиндров из диэлектрического материала со следующими видами металлизации, представленных на рисунке 1:

- вид № 1 – полная металлизация боковой поверхности (рисунок 1, а);
- вид № 2 – частичная металлизация в области с угловой шириной $\alpha = 20^\circ$ вдоль образующей (рисунок 1, б);
- вид № 3 – частичная металлизация в области с угловой шириной $\alpha = 20^\circ$ при равном удалении границ от торцов на расстояния, составляющие 10 % от длины образующей (рисунок 1, в).

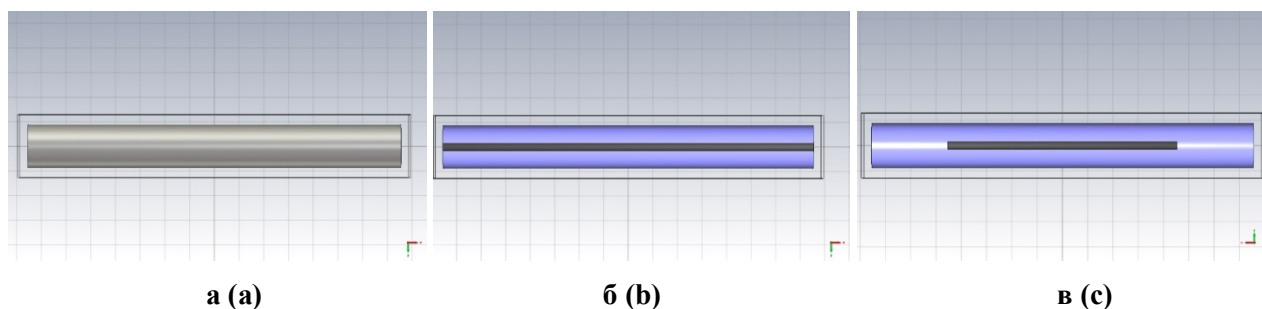


Рисунок 1 – Виды объектов цилиндрической формы: а – № 1; б – № 2; в – № 3
Figure 1 – Types of cylindrical objects: a – No. 1; b – No. 2; c – No. 3

На рисунке 2 приведены моноэлектрические диаграммы рассеяния цилиндров при $h/\lambda = 5$.

Рассчитанные абсолютные (в м^2) и относительные ($\text{дБ}\cdot\text{м}^2$) значения эффективных площадей рассеяния исследуемых объектов с осевой симметрией представлены в таблице 1. По результатам их анализа оцениваются энергетические показатели вторичного излучения и изменения отражательных свойств цилиндров в зависимости от вида металлизации.

Установлено, что при равных электрических размерах идеально проводящего и частично металлизированного цилиндров их моноэлектрические диаграммы рассеяния в секторе углов порядка 60° близки по форме, различия значений эффективных площадей рассеяния не превышают $0,9 \text{ дБ}\cdot\text{м}^2$.

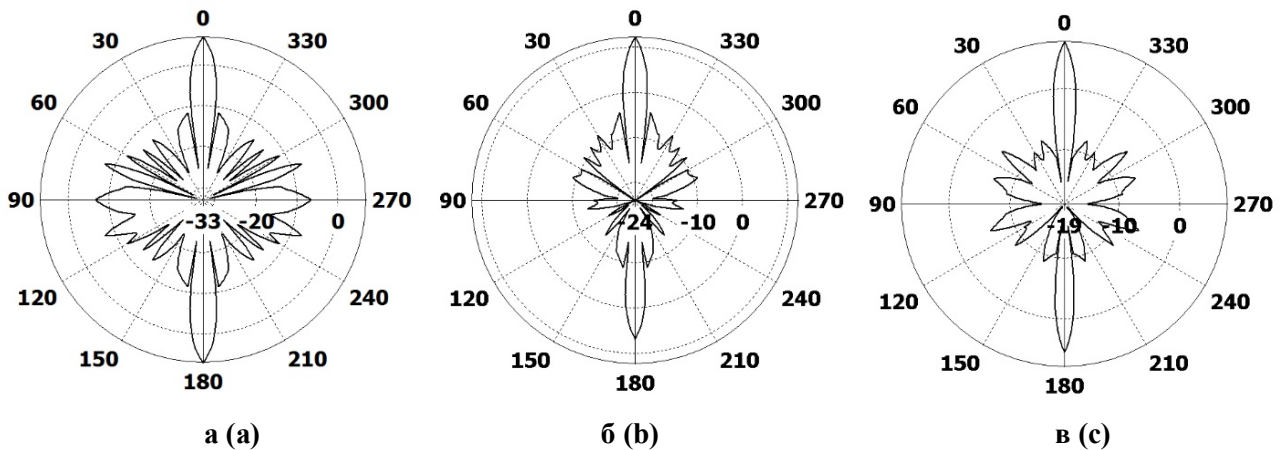


Рисунок 2 – Моностатические диаграммы рассеяния объектов: а – № 1; б – № 2; в – № 3
Figure 2 – Monostatic object scattering diagrams: a – No. 1; b – No. 2; c – No. 3

Угловое положение максимумов диаграмм обратного рассеяния объектов вида № 2 и № 3 находится в направлении начала отсчета 0° , симметрично полярной оси на противоположной стороне, относительно образующей с металлизацией. Затекание за край и отражение от кромок идеально проводящей полосы поверхностных токов в результате дифракции облучающих волн и вторичного излучения приводит к уменьшению лепестков диаграмм до 2 раз со стороны её размещения [12].

Таблица 1 – Значения эффективной площади рассеяния исследуемых объектов
Table 1 – Radar cross section values of the objects under study

Вид цилиндра, №	Величина эффективной площади рассеяния, м / дБ м ²		
	$h/\lambda = 5$	$h/\lambda = 10$	$h/\lambda = 15$
1	4,8 / 6,8	1,2 / 0,8	0,5 / -2,7
2	16,8 / 12,3	4,1 / 6,1	1,9 / 2,7
3	7,9 / 6,1	1,5 / 1,7	0,7 / -1,8

Анализ диаграмм рассеяния вибраторных антенных решеток на цилиндрах

В качестве примера применения разработанных моделей рассмотрим линейную антенную решетку из $N=3$ с шагом $d/\lambda=0,25$ и $d/\lambda=0,5$, расположенную на идеально проводящем цилиндре электрической длиной $h/\lambda=5$ и электрическим радиусом поперечного сечения $a/\lambda=0,3$ с диэлектрическим покрытием толщиной $\Delta/\lambda=0,1$ характеризуемым диэлектрической проницаемостью $\varepsilon=3,2$. Электрическая длина вибратора $l_0/\lambda=0,2$, относительное удаление первого антенного элемента от торца цилиндра $l/\lambda=0,3$.

Поле, рассеиваемое антенной решеткой на боковой поверхности цилиндра, определяется суперпозицией полей антенных элементов и дифракционного поля несущей поверхности. Токи элементарных электрических вибраторов сохраняют постоянными значения амплитуд и фаз в каждой точке поверхности. Вторичное поле цилиндра находится при равенстве нулю тангенциальной составляющей полного электрического поля на его поверхности. Для вычисления поверхностных токов используется аппарат интегральных уравнений Фредгольма. Решение краевых задач выполняется при математической регуляризации [13] с выделением особенностей ядер для совпадающих точек интегрирования и наблюдения. В [14] получены системы сингулярных интегральных уравнений с ядрами типа Коши для продольных и поперечных составляющих токов и выполнено их решение путем самосогласованного обращения интегральных операторов.

На рисунке 3 приведен вид диаграммы рассеяния антенной решетки в рабочем окне программы CST MWS. Её относительный период составляет $d/\lambda=0,25$, вибраторы расположены

на образующей цилиндра. На рисунке 4 показаны результаты расчета диаграммы для решетки с $d/\lambda = 0,5$. При моделировании источник облучения размещался со стороны антенных элементов.

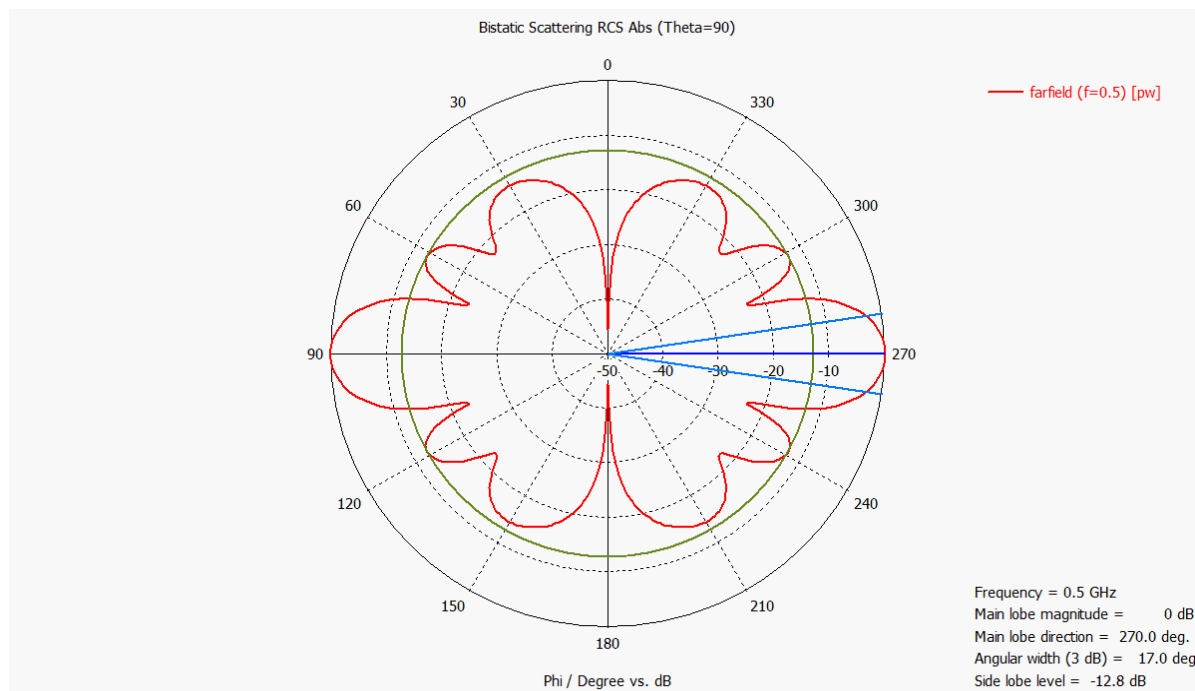


Рисунок 3 – Вид диаграммы рассеяния антенной решетки с периодом 0,25 на цилиндре
Figure 3 – View of antenna array scattering diagram with a period of 0,25 on a cylinder

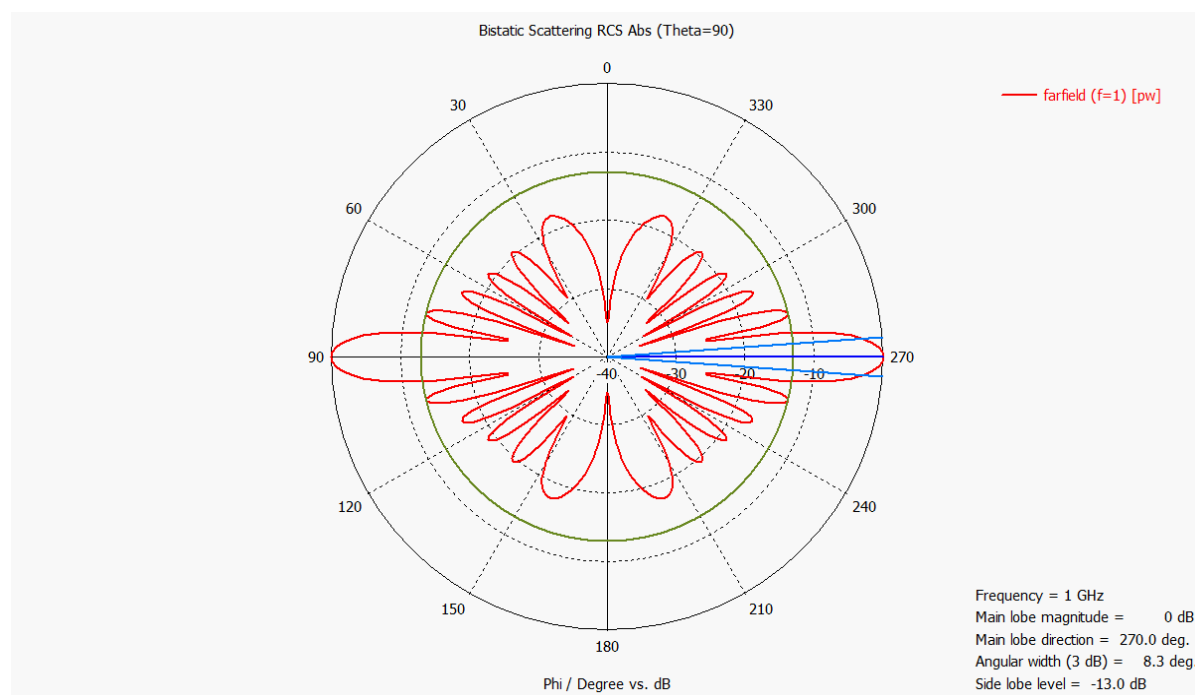


Рисунок 4 – Вид диаграммы рассеяния антенной решетки с периодом 0,5 на цилиндре
Figure 4 – View of antenna array scattering diagram with a period of 0,5 on a cylinder

Из представленных результатов следует, что сужение диаграммы рассеяния по мере уменьшения длины волны обусловлено возрастанием электромагнитного взаимодействия между вибраторами за счет повышения плотности потока вторичного поля. При $d/\lambda = 0,5$ ширина главного максимума диаграммы составляет 17° , а при $d/\lambda = 0,25$ не превышает $8,3^\circ$.

Заключение

С использованием программы электродинамического моделирования CST MWS получены моностатические диаграммы рассеяния объектов с осевой симметрией при различной степени металлизации образующих.

При помощи активации программного компонента Frequency Domain Solver рассчитаны поверхностные токи для областей частичной металлизации цилиндров. Генерация координат узлов поверхности объектов осуществлялась автоматически, для более точного воспроизведения формы при сеточном разбиении применялись ячейки треугольной, гексагональной и тетрагональной формы.

Численный расчет токов проведен с применением метода конечных элементов FEM. Комплексные амплитуды представлялись ортогональными функциями с весовыми коэффициентами и вычислялись в узлах сетки. Распределения сшивались при условии равенства значений на краях областей.

Полученные результаты могут использоваться для оценки рассеивающих свойств антенных систем и элементов конструкций в составе мобильных радиотехнических комплексов, а также при разработке способов снижения вторичного излучения в секторах дистанционного обнаружения за счет оптимизации вида участков металлизации с учетом размещения на носителе.

Библиографический список

1. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под ред. Л.Т. Тучкова. М.: Радио и связь. 1985. 236 с.
2. **Малушков Г. Д.** Рассеяние неоднородным диэлектрическим телом вращения // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 1975. Т. XVIII. № 2. С.269–280.
3. **Штагер Е. А., Чаевский Е. В.** Рассеяние волн на телах сложной формы. М.: Советское радио, 1974. 240 с.
4. **Львова Л. А.** Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: РФЯЦ ВНИИТФ, 2003. 232 с.
5. **Резников Г. Б.** Антенны летательных аппаратов. М.: Советское радио, 1967. 416 с.
6. **Разиньков С. Н., Богословский А. В., Борисов Д. Н.** Исследование направленных свойств решеток элементарных электрических вибраторов на круглых идеально проводящих цилиндрах конечной длины // Радиотехника. 2020. №2 (3). С.46-54.
7. **Разиньков С. Н., Разинькова О. Э., Баранов С. О.** Анализ диаграмм направленности и бистатического рассеяния линейных антенных решеток беспилотного летательного аппарата со сниженной радиолокационной заметностью // Радиотехника. 2020. № 5(10). С. 43-52.
8. **Разиньков С. Н., Богословский А. В., Борисов Д. Н., Матвеев Д. С.** Анализ вибраторных антенных решеток малозаметных беспилотных летательных аппаратов самолетного типа. Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 18. С. 227-236 [Электронный ресурс] Режим доступа: http://академия-ввс.рф/images/data/zhurnal_vks/18-2021/227-236.pdf. Дата обращения 08.09.2022 г.
9. **Курушин А. А., Пластиков А. Н.** Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: МЭИ, 2011. 155 с.
10. **Неганов В. А.** Физическая регуляризация некорректных задач электродинамики: линии передачи, антенны, дифракция электромагнитных волн. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2008. 432 с.
11. **Разиньков С. Н., Богословский А. В.** Синтез продольных щелевых решеток на идеально проводящей полосе с максимальными коэффициентами направленного действия и нулями диаграмм направленности // Успехи современной радиоэлектроники, 2012. №4. С. 83-93.
12. **Разиньков С. Н., Богословский А. В., Борисов Д. Н.** Совместное применение аналитических и численных методик электродинамического моделирования для синтеза решеток электрических вибраторов на цилиндрах конечной длины // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 20. С. 284-300 URL: http://academy-vvs.ru/docs/editions/VKS/zhurnal_vks/20-2021/284-300.pdf. Дата обращения 08.09.2022.
13. **Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 288 с.
14. **Неганов В. А., Корнев М. Г.** Сингулярное интегральное уравнение в задаче дифракции плоской электромагнитной волны на идеально проводящем полом цилиндра конечной длины // Доклады Академии наук Российской Федерации, 2004. Т. 399. № 1. С. 11-13.

UDK 621.396.67.01

SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY DIELECTRIC AND METALLIZED OBJECTS WITH AXIAL SYMMETRY

A. V. Bogoslovsky, Ph.D. (Tech.), deputy head of the Department of Radio Electronics, VUNC VVS «VVA», Voronezh, Russia;
orcid.org/0000-0002-6469-3366, e-mail: bogosandrej@yandex.ru

The scattering properties of dielectric and metallized objects with axial symmetry are estimated using CST MWS – Computer Simulation Technology Microwave Studio electrodynamic modeling software package. In order to study scattering diagrams for various types of spatial distribution of reflective surfaces complex permittivity, secondary electromagnetic radiation was modeled by finite-length cylinders with regular cross-sectional radius for partial and complete metallization of side surfaces.

The distribution of surface currents on a cylinder was determined by FEM (Finite Element Method). The calculation of polarization components of the field and a cylinder scattering diagram was carried out by activating Frequency Domain Solver built into the structure of CST MWS program, which provides the determination of the coordinates in approximating grid with different types of cells.

In sampling zones, complex amplitudes of currents were determined by the method of MoM moments – Method of Moments with partial inversion of boundary value problems operators.

The results obtained show that the maxima of scattering diagrams of cylinders with perfectly conducting bands on side surfaces are concentrated in space sectors opposite to metallization region. The results also show that in the sector of 60° width angles the cylinder scattering diagrams of equal electrical dimensions with full and partial metallization are similar in shape.

The aim of the work is to study the patterns of secondary electromagnetic radiation of dielectric objects with different degrees of surface metallization.

Key words: an object with axial symmetry, electromagnetic waves scattering, scattering diagram, electrodynamic modeling program, boundary value problem of electrodynamics.

DOI: 10.21667/1995-4565-2022-82-19-26

References

1. Radiolokacionnye harakteristiki letatel'nyh apparatov / Pod red. L.T. Tuchkova. Moscow: Radio i svjaz'. 1985. 236 p. (in Russian).
2. Malushkov G. D. Rasseyaniye neodnorodnym dijelektricheskim telom vrashheniya. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radiofizika*. 1975, vol. XVIII, no. 2, pp.269-280. (in Russian).
3. Shtager E. A., Chaevskij E. V. Rasseyaniye voln na telah slozhnoj formy. Moscow: Sovetskoe radio, 1974. 240 p. (in Russian).
4. L'vova L. A. Radiolokacionnaya zametnost' letatel'nyh apparatov. Snezhinsk: RFJaC VNIITF. 2003. 232 p. (in Russian).
5. Reznikov G. B. Antenny letatel'nyh apparatov. Moscow: Sovetskoe radio. 1967. 416 p. (in Russian).
6. Razin'kov S. N., Bogoslovskij A. V., Borisov D. N. Issledovanie napravlennyh svojstv reshetok jelementarnykh jelektricheskikh vibratorov na kruglykh ideal'no provodjashhih cilindrah konechnoj dliny. *Radio-tehnika*. 2020, no. 2 (3), pp.46-54. (in Russian).
7. Razin'kov S. N., Razin'kova O. Je., Baranov S. O. Analiz diagramm napravlenosti i bistaticheskogo rasseyaniya linejnykh antennykh reshetok bespilotnogo letatel'nogo apparata so snizhennoj radiolokacionnoj zametnost'ju. *Radiotekhnika*. 2020, no. 5(10), pp. 43-52. (in Russian).
8. Razin'kov S. N., Bogoslovskij A. V., Borisov D. N., Matveev D. S. Analiz vibratornykh antennykh reshetok malozametnykh bespilotnykh letatel'nyh apparatov samoletnogo tipa. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teorija i praktika*. 2021, no. 18, pp. 227-236 [Elektronnyj resurs] Rezhim dostupa: http://akademija-vvs.rf/images/data/zhurnal_vks/18-2021/227-236.pdf. Data obrashhe-niya 08.09.2022 g. (in Russian).
9. Kurushin A. A., Plastikov A. N. Proektirovanie SVCh ustrojstv v srede CST Microwave Studio. Moscow: MJeI. 2011, 155 p. (in Russian).

10. **Neganov V. A.** *Fizicheskaja reguljarizacija nekorrektnyh zadach jelectrodinamiki: linii peredachi, antenny, difrakcija jelectromagnitnyh voln.* Moscow: SAJNS-PRESS. 2008. 432 p. (in Russian).
11. **Razin'kov S. N., Bogoslovskij A. V.** Sintez prodol'nyh shhelevykh reshetok na ideal'no provodjashhej polose s maksimal'nymi koeficientami napravlenno go dejstvija i nuljami diagramm napravlenosti. *Uspehi sovremennoj radiojelektroniki*. 2012, no. 4, pp. 83-93. (in Russian).
12. **Razin'kov S. N., Bogoslovskij A. V., Borisov D. N.** Sovmestnoe primenenie analiticheskikh i chislennykh metodik jelectrodinamicheskogo modelirovanija dlja sinteza reshetok jelectricheskikh vibratorov na cilindrah konechnoj dliny. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teorija i praktika*. 2021, no. 20, pp. 284-300 URL: http://academy-vvs.ru/docs/editions/VKS/zhurnal_vks/20-2021/284-300.pdf. Data obrashhenija 08.09.2022. (in Russian).
13. **Tihonov A. N., Arsenin V. Ja.** *Metody reshenija nekorrektnyh zadach.* Moscow: Nauka. 1986, 288 p. (in Russian).
14. **Neganov V. A., Kornev M. G.** Singuljarnoe integral'noe uravnenie v zadache difrakcii ploskoj jelectromagnitnoj volny na ideal'no provodjashhem polom cilindre konechnoj dliny. *Doklady Akademii nauk Rossijskoj Federacii*. 2004, vol. 399, no. 1, pp. 11-13. (in Russian).