

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПЕРЕМЕННО-ФАЗНЫХ УЧАСТКОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛЯ НА ИЗЛУЧЕНИЕ АНТЕННЫ

А. Н. Якимов

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
y_alder@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В радиотехнических системах различного назначения при решении задач на максимальных дальностях в широком секторе углов используются микроволновые антенны с диаграммой направленности секторного вида. Для формирования такой диаграммы направленности в антенне требуется создать переменнo-фазное распределение источников возбуждения (токов или полей). Модельное исследование влияния формы отдельных участков переменнo-фазным распределением поля в апертуре микроволновой антенны на параметры ее квазисекторной диаграммы направленности может быть проведено путем представления этого распределения комбинацией математических функций с использованием логики предикатов. *Материалы и методы.* Предложен подход к решению этой задачи, основанный на использовании свойства аддитивности определенного интеграла, позволяющего заменить его суммой определенных интегралов, взятых по частичным промежуткам, и независимо управлять распределением поля на этих промежутках. При этом появляется возможность дополнительного управления формой отдельных участков переменнo-фазного распределения поля в апертуре микроволновой антенны за счет изменения степени функций, описывающих эти участки. Показана возможность программной реализации предложенной математической модели в системе MATLAB с использованием логики предикатов. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования влияния формы отдельных участков переменнo-фазного распределения поля в апертуре микроволновой антенны на основные параметры ее диаграммы направленности. Полученные результаты указывают на перспективность модельного представления переменнo-фазного распределения поля в апертуре микроволновой антенны с квазисекторной ДН комбинацией тригонометрических функций произвольной степени с использованием логики предикатов для исследования влияния формы его отдельных участков на диаграмму направленности этой антенны и улучшения ее параметров.

Ключевые слова: микроволновая антенна, математическая модель, распределение поля, переменнo-фазные участки, диаграмма направленности, логика предикатов

Для цитирования: Якимов А. Н. Модельное исследование влияния формы переменнo-фазных участков распределения поля на излучение антенны // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 3. С. 82–89. doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-9

A MODEL STUDY OF THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF VARIABLE-PHASE FIELD DISTRIBUTION AREAS ON ANTENNA RADIATION

A.N. Yakimov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia
y_alder@mail.ru

Abstract. *Background.* In radio engineering systems for various purposes, microwave antennas with a radiation pattern of a sector type are used to solve problems at maximum ranges in a wide range of angles. To form such a directional pattern in an antenna, it is necessary to create a variable-phase distribution of excitation sources (currents or fields). A model study of the influence of the shape of individual areas by the variable-phase field distribution in the aperture of a microwave antenna on the parameters of its quasi-sector radiation pattern can be carried out by representing this distribution by a combination of mathematical functions using predicate logic. *Materials and methods.* An approach to solving this problem is proposed based on the use of the additivity property of a definite integral, which allows replacing it with the sum of definite integrals taken over partial intervals and independently controlling the

distribution of the field over these intervals. At the same time, it becomes possible to additionally control the shape of individual areas of the variable-phase field distribution in the aperture of the microwave antenna by changing the degree of functions describing these areas. The possibility of software implementation of the proposed mathematical model in the MATLAB system using predicate logic is shown. *Results and conclusions.* The results of a model study of the influence of the shape of individual sections of the variable-phase field distribution in the aperture of a microwave antenna on the main parameters of its radiation pattern are presented. The results obtained indicate the prospects of a model representation of the variable-phase field distribution in the aperture of a microwave antenna with a quasi-sector radiation pattern by combination of trigonometric functions of arbitrary degree using predicate logic to study the influence of the shape of its individual areas on the radiation pattern of this antenna and improve its parameters.

Keywords: microwave antenna, mathematical model, field distribution, variable-phase areas, radiation pattern, predicate logic

For citation: Yakimov A.N. A model study of the influence of the shape of variable-phase field distribution areas on antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(3):82–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-3-9

Введение

В радиотехнических системах различного назначения при решении задач на максимальных дальностях в широком секторе углов используются микроволновые антенны с диаграммой направленности (ДН) секторного вида. Задачу математического синтеза такой ДН относят к некорректным задачам математической физики, решение которых может быть получено лишь с некоторым приближением. Для формирования такой квазисекторной ДН в антенне требуется создать переменнo-фазное распределение источников возбуждения (токов или полей) [1, 2].

В большинстве известных математических решений, моделирующих излучение микроволновой антенны с квазисекторной ДН, параметры распределения источников возбуждения оказываются взаимозависимыми, что не позволяет провести детальное исследование связи параметров распределения источников возбуждения с параметрам ДН и получить оптимальное решение при проектировании антенн такого типа [3, 4].

Влияние основных параметров переменнo-фазного распределения источников возбуждения (максимального уровня противофазных участков (УПУ) и коэффициента, характеризующего долю их протяженности в главном сечении антенны) на параметры ДН в значительной мере уже исследовано, но влияние формы его отдельных участков на ДН антенны изучено недостаточно.

Таким образом, актуальной является задача модельного представления переменнo-фазного распределения поля в апертуре микроволновой антенны комбинацией математических функций с использованием логики предикатов для исследования влияния формы его отдельных участков на параметры антенны с квазисекторной ДН и их улучшения.

Постановка задачи

Рассмотрим апертурную микроволновую антенну с остронаправленной квазисекторной ДН, которую можно считать разделяющейся. У таких ДН горизонтальное сечение $F(\varphi)$ имеет одинаковую форму для разных фиксированных значений угла θ в вертикальной плоскости, и наоборот, вертикальное сечение $F(\theta)$ имеет одинаковую форму для разных фиксированных значений угла φ в горизонтальной плоскости. При этом возникает возможность управления формой ДН антенны за счет изменения амплитудно-фазового распределения электрической составляющей электромагнитного поля в каждой из плоскостей декартовой системы координат отдельно [5].

Математическая модель излучения такой микроволновой антенны в интегральной форме может быть представлена определенным интегралом следующим образом [3, 4]:

$$R(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 f(y) e^{jzy} dy, \quad (1)$$

где $R(z)$ – функция, описывающая ДН антенны по полю в горизонтальной плоскости; $z = \pi(l/\lambda)\sin\varphi$; l – линейный размер главного сечения апертуры антенны в горизонтальной плоскости; λ – длина электромагнитной волны в свободном пространстве; φ – угол в горизонтальной плоскости между направлением на точку наблюдения и нормалью к антенне; $y = 2x/l$; x – расстояние до текущей точ-

ки главного сечения апертуры антенны относительно ее центра в горизонтальной плоскости; $f(y)$ – распределение поля в горизонтальном сечении апертуры антенны.

Свойство аддитивности определенного интеграла позволяет заменить его суммой определенных интегралов, взятых по частичным промежуткам, и независимо управлять распределением поля $f(y)$ на этих промежутках [6].

Таким образом, появляется возможность дополнительного управления формой отдельных участков переменного-фазного распределения поля в апертуре микроволновой антенны и исследовать влияние этой формы на ДН антенны. Перспективным математическим аппаратом для программной реализации решения этой задачи является логика предикатов [7, 8].

Построение математической модели

Для расчета ДН антенны в MatLAB удобно представить распределение поля $f(y)$ в смещенном виде, изменив в нем пределы интегрирования от -1 до 1 на интервал от 0 до 2 . При этом выражение (1) преобразуется к виду [9]

$$R(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^2 f(y) e^{jyz} dy. \quad (2)$$

Выражение (2) при этом может быть представлено как

$$R(z) = \int_0^2 f(y) e^{jyz} dy = \int_0^2 f(y) \cos yz dy + j \int_0^2 f(y) \sin yz dy. \quad (3)$$

Приняв обозначения

$$F_1(y) = f(y) \cos yz, \quad F_2(y) = f(y) \sin yz,$$

получим

$$R(z) = \int_0^2 F_1(y) dy + j \int_0^2 F_2(y) dy = A + iB = |R_t(z)| e^{i\Phi(z)}, \quad (4)$$

где $A = \int_0^2 F_1(y) dy$, $B = \int_0^2 F_2(y) dy$, $|R(z)| = \sqrt{A^2 + B^2}$ – искомая амплитудная ДН; $\Phi(z)$ – фазовая ДН.

Распределение поля $f(y)$ представим в виде трех независимых частей, описываемых тригонометрическими функциями. При этом центральный участок распределения поля от $y_{01} = 1 - (1/\alpha_0)$ до $y_{02} = 2 - y_{01}$ опишется выражением

$$f_1(y) = A_1 \cdot \cos^m \left[\frac{\pi \alpha_0}{2} (y - 1) \right], \quad (5)$$

где A_1 – коэффициент амплитуды главного лепестка распределения; m – произвольная (целая или дробная) степень; $\alpha_0 = 1/y_0$ – параметр, характеризующий долю противофазных участков в распределении поля; y_0 – координата точки смены фазы в сечении амплитудного распределения.

Первый противофазный участок распределения $f(y)$ на интервале от 0 до y_{01} опишется выражением

$$f_{21}(y) = -A_2 \cdot |\sin [\pi \alpha_0 (1 - y)]|^p, \quad (6)$$

где A_2 – коэффициент амплитуды противофазных участков распределения, задающий максимальный уровень противофазного участка (УПУ); p – произвольная степень.

Второй противофазный участок распределения $f(y)$, расположенный на интервале от y_{02} до 2 , опишется выражением

$$f_{22}(y) = -A_2 |\sin [\pi \alpha_0 (y_{02} - y)]|^p. \quad (7)$$

Для алгоритмического объединения выражений (5)–(7) в единую математическую модель удобно использовать логику предикатов. При этом обязательным является выполнение условия комплементарности, в соответствии с которым [7, 8]

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1, \quad a_i \in \{0,1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

Здесь весовые коэффициенты a_i являются двузначными предикатами, а элементарными функциями, воспроизводящими операции выбора одной из двух переменных, являются предикатные конъюнкция и дизъюнкция.

Тогда операция суперпозиции элементов вектора предметных переменных $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ с этими весовыми коэффициентами позволит подключать их независимо и получить результат G :

$$G = a_1 u_1 + a_2 u_2 + \dots + a_n u_n. \quad (9)$$

Предметными переменными в решаемой задаче являются функции $f_1(y)$, $f_{21}(y)$ и $f_{22}(y)$, описывающие отдельные участки переменного-фазного распределения поля, т.е. $n = 3$. Условия комплементарности при этом описываются как

$$a_1 + a_2 + a_3 = 1, \quad (10)$$

а весовые коэффициенты в виде удобном для программной реализации в системе MATLAB определены следующим образом:

$$\begin{cases} a_1 = (y \geq 0) \& (y < y_{01}), & a_2 = (y \geq y_{01}) \& (y \leq y_{02}), \\ a_3 = (y > y_{02}) \& (y \leq 2). \end{cases} \quad (11)$$

В результате суперпозиции в соответствии с формулой (9) получим

$$f(y) = a_1 f_{21}(y) + a_2 f_1(y) + a_3 f_{22}(y). \quad (12)$$

Таким образом, выражения (4)–(7), (11), (12) представляют собой математическую модель излучения микроволновой антенны с квазисекторной ДН и позволяют провести необходимые исследования.

Результаты моделирования

Расчеты, проведенные в MatLAB с использованием предложенной математической модели для $l/\lambda = 27$, $\alpha_0 = 1,9$, $A_1 = 1$ и $A_2 = 0,1$, позволили оценить влияния формы отдельных участков переменного-фазного распределения поля $f(y)$ в апертуре микроволновой антенны на основные параметры ее ДН [10].

Управление формой центрального участка распределения поля $f(y)$ за счет изменения степени m дает следующие результаты. Исходное распределение поля $f(y)$ в апертуре антенны при $p = 1$ и $m = 1$ (рис. 1, кривая 1) формирует ДН $R(\varphi)$ (рис. 2, кривая 1) шириной на уровне половинной мощности $2\varphi_{0,5} \approx 6,3$ град с малой пульсацией (провалом) вершины главного лепестка $|\Delta| \approx 0,03$ дБ и максимальным уровнем боковых лепестков (УБЛ) $R_{MSL} \approx -24,8$ дБ.

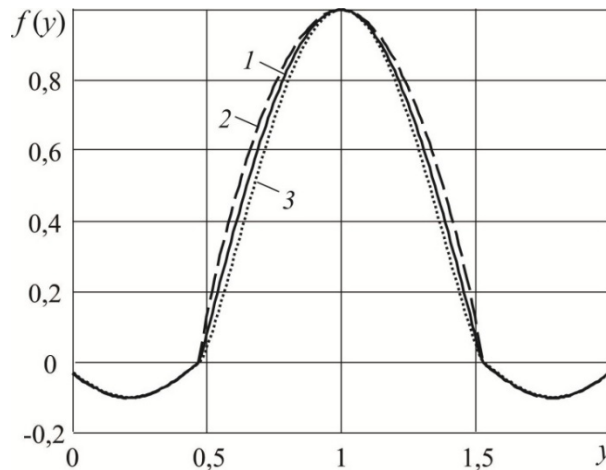


Рис. 1. Распределение поля в апертуре антенны $f(y)$ при $p = 1$:
 $1 - m = 1$; $2 - m = 0,8$; $3 - m = 1,2$

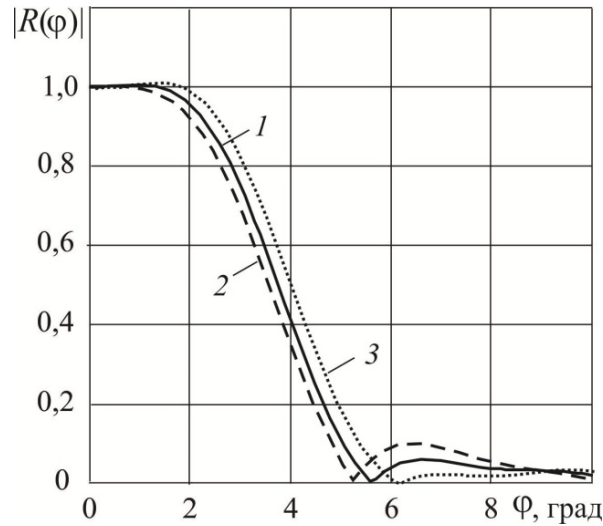


Рис. 2. Диаграммы направленности антенны $|R(\varphi)|$ при $p = 1$:
 1 – $m = 1$; 2 – $m = 0,8$; 3 – $m = 1,2$

Уменьшение степени m функции, описывающей центральный участок распределения поля $f(y)$, до $m = 0,8$ (рис. 1, кривая 2) приводит (рис. 2, кривая 2) к уменьшению пульсации до $|\Delta| = 0$ дБ, сужению ДН $R(\varphi)$ до $2\varphi_{0,5} \approx 6,0$ град и росту УБЛ до $R_{MSL} \approx -20,6$ дБ. Увеличение степени m функции, описывающей центральный участок распределения поля $f(y)$, до $m = 1,2$ (рис. 1, кривая 3) приводит (рис. 2, кривая 3) к увеличению пульсации до $|\Delta| \approx 0,11$ дБ, расширению ДН $R(\varphi)$ до $2\varphi_{0,5} \approx 6,5$ град и снижению УБЛ до $R_{MSL} \approx -29,2$ дБ.

Управление формой противофазных участков распределения поля $f(y)$ относительно исходного распределения поля $f(y)$ при $m = 1$ и $p = 1$ (рис. 3, кривая 1) и соответствующей ДН $R(\varphi)$ (рис. 4, кривая 1) за счет изменения степени p дает следующие результаты.

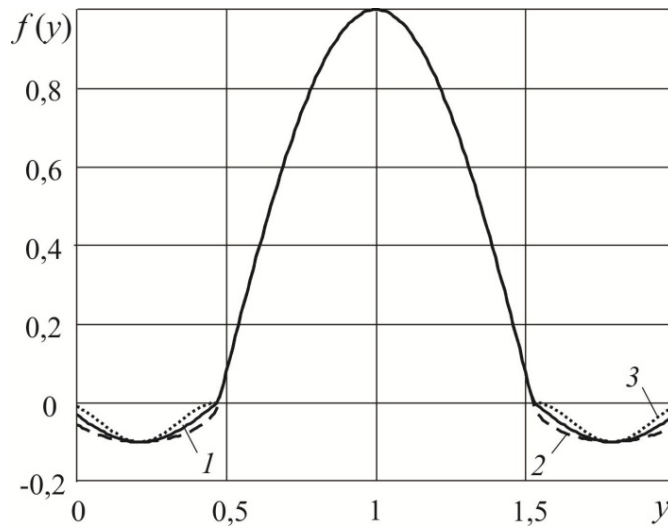


Рис. 3. Распределение поля в апертуре антенны $f(y)$ при $m = 1$:
 1 – $p = 1$; 2 – $p = 0,5$; 3 – $p = 2$

Лишь значительное уменьшение степени p функций, описывающих противофазные участки распределения поля $f(y)$, до $p = 0,5$ (рис. 3, кривая 2) приводит (рис. 4, кривая 2) к заметному увеличению пульсации вершины до $|\Delta| \approx 0,12$ дБ, расширению ДН $R(\varphi)$ до $2\varphi_{0,5} \approx 6,5$ град и незначительному росту УБЛ до $R_{MSL} \approx -24,4$ дБ. Увеличение степени p функций, описывающей противофазные участки распределения поля $f(y)$, до $p = 2$ (рис. 3, кривая 3) приводит (рис. 4, кривая 3) к уменьшению пульсации до $|\Delta| = 0$ дБ, сужению ДН $R(\varphi)$ до $2\varphi_{0,5} \approx 6,1$ град и снижению УБЛ до $R_{MSL} \approx -25,3$ дБ.

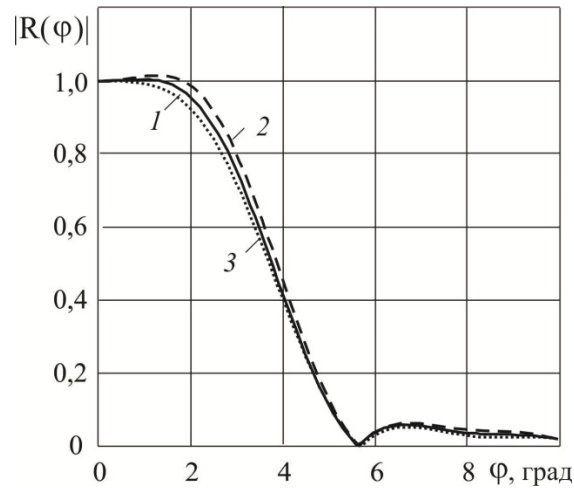


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны $|R(\varphi)|$ при $m = 1$:
 $1 - p = 1$; $2 - p = 0,5$; $3 - p = 2$

Результаты модельного исследования указывают на то, что изменения формы центрального участка распределения поля $f(y)$ за счет изменения степени m оказывают более существенное влияние на параметры ДН микроволновой антенны, чем изменение формой противофазных участков этого распределения поля. Выявлены следующие тенденции изменения значений параметров ДН: с уменьшением m относительно значения $m = 1$ ширина $2\varphi_{0,5}$ и величина пульсации вершины ДН $|\Delta|$ уменьшаются, а УБЛ R_{MSL} растет; с увеличением m относительно значения $m = 1$ ширина $2\varphi_{0,5}$ и величина пульсаций вершины ДН $|\Delta|$ увеличиваются, а УБЛ R_{MSL} уменьшается. Изменение формы противофазных участков распределения поля выявило противоположную тенденцию: с уменьшением p относительно значения $p = 1$ ширина $2\varphi_{0,5}$ и величина пульсации вершины ДН $|\Delta|$ увеличиваются более интенсивно, чем УБЛ R_{MSL} ; с увеличением m относительно значения $m = 1$ ширина $2\varphi_{0,5}$ и величина пульсации вершины ДН $|\Delta|$ и УБЛ R_{MSL} уменьшаются.

Дополнительное модельное исследование позволило выявить следующие зависимости параметров квазисекторной ДН $R(\varphi)$ от степени m , оказывающей значительное большее влияние на ДН, чем степень p (рис. 5). В заданном интервале изменения m от 0,6 до 1,6 отличия расчетной ДН от секторной оказываются допустимыми.

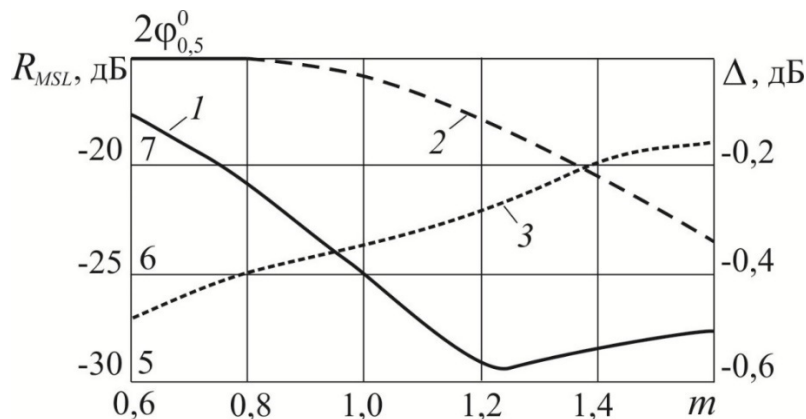


Рис. 5. Зависимости параметров квазисекторной ДН от m при $p = 1$:
 $1 - R_{MSL}$; $2 - \Delta$; $3 - 2\varphi_{0,5}$

За пределами указанного интервала отличия расчетной ДН от секторной становятся уже значительными: при $m < 0,6$ вершина главного лепестка ДН становится острой, а при $m > 1,6$ растет пульсация этого лепестка $|\Delta|$ и искажается его форма.

При этом видно, что УБЛ R_{MSL} (рис. 5, кривая 1) в заданном интервале изменения m имеет минимум, а величина пульсации $|\Delta|$ (рис. 5, кривая 2) и ширина ДН $2\varphi_{0,5}$ (рис. 5, кривая 3) увеличива-

ются, что указывает на возможность оптимизации такой микроволновой антенны с использованием предложенной математической модели.

Таким образом, полученные результаты указывают на перспективность модельного представления переменного-фазного распределения поля в апертуре микроволновой антенны с квазисекторной ДН комбинацией математических функций с использованием логики предикатов для исследования влияния формы его отдельных участков на характеристику направленности этой антенны и улучшения ее параметров. Они подтверждают возможность использования построенной математической модели в проектировании микроволновых антенн с переменного-фазным распределением поля совместно с другими моделями, разработанными ранее [4, 10, 11].

Заключение

Предложенный подход к решению задачи математического моделирования излучения микроволновой антенны с квазисекторной ДН, основанный на сочетании аналитических и численных методов, позволяет описать отдельные участки рассматриваемого переменного-фазного распределения поля тригонометрическими функциями произвольной степени, изменение которой дает возможность управлять формой этих участков. Использование логики предикатов в программной реализации предложенной математической модели значительно облегчает решение задачи моделирования и весьма перспективно.

Полученные результаты модельного исследования влияния формы отдельных участков переменного-фазного распределения поля в апертуре микроволновой антенны на основные параметры ее ДН указывают на возможность дополнительного улучшения этих параметров. Независимое управление формой отдельных участков распределения поля целесообразно использовать при проектировании микроволновых антенн для радиотехнических систем различного назначения.

Список литературы

1. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д. И. Воскресенского. М. : Радиотехника, 2006. 376 с.
2. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л. : Судостроение, 1967. 518 с.
3. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. М. : Сов. радио, 1969. 296 с.
4. Якимов А. Н. Условия формирования секторной диаграммы направленности с минимальным уровнем боковых лепестков // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: ОТ. 1980. Вып. 4. С. 79–80.
5. Дробрин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
6. Дмитриев В. И., Захаров Е. В. Метод интегральных уравнений в вычислительной электродинамике. М. : МАКС Пресс, 2008. 316 с.
7. Волгин Л. И. Элементарный базис комплементарной алгебры: комплементарный релятор // Проектирование и технология электронных средств. 2001. № 1. С. 10–11.
8. Якимов А. Н. Предикатная алгебра выбора в моделировании антенн сложной конфигурации // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 78–83.
9. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. В. П. Дьяконова. М. : Нолидж, 2001. 880 с.
10. Якимов А. Н. Методы определения параметров при расчете диаграммы направленности антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2014. Т. 1. С. 74–75.
11. Якимов А. Н. Универсальная модель излучения микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 5–12.

References

1. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroystva SVCh i antennoy = Microwave devices and antennas*. Moscow: Radiotekhnika, 2006:376. (In Russ.)
2. Kyun R. *Mikrovolnovyye antennoy = Microwave antennas*. Leningrad: Sudostroenie, 1967:518. (In Russ.)
3. Minkovich B.M., Yakovlev V.P. *Teoriya sinteza antennoy = Theory of antenna synthesis*. Moscow: Sov. radio, 1969:296. (In Russ.)
4. Yakimov A.N. Conditions for the formation of a sectoral directional pattern with a minimum level of side lobes. *Voprosy radioelektroniki. Ser.: OT = Radio electronics issues. Series: OT*. 1980;(4):79–80. (In Russ.)
5. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernyye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)
6. Dmitriev V.I., Zakharov E.V. *Metod integral'nykh uravneniy v vychislitel'noy elektrodinamike = Method of integral equations in computational electrodynamics*. Moscow: MAKS Press, 2008:316. (In Russ.)

7. Volgin L.I. Elementary basis of complementary algebra: complementary relator. *Proektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2001;(1):10–11. (In Russ.)
8. Yakimov A.N. Predicate algebra of choice in modeling antennas of complex configuration. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(1):78–83. (In Russ.)
9. D'yakonov V.P., Abramenkova I.V., Kruglov V.V. *MatLAB 5.3.1 s paketami rasshireniy = MatLAB 5.3.1 with extension packages*. Moscow: Nolidzh, 2001:880. (In Russ.)
10. Yakimov A.N. Methods for determining parameters when calculating the antenna radiation pattern. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2014;1:74–75. (In Russ.)
11. Yakimov A.N. Universal model of microwave antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):5–12. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Якимов

доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры конструирования
 и технологий электронных и лазерных средств,
 Санкт-Петербургский государственный университет
 аэрокосмического приборостроения
 (Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)
 E-mail: y_alder@mail.ru

Aleksandr N. Yakimov

Doctor of technical sciences, professor,
 professor of the sub-department of construction
 and technology of electronic and laser equipment,
 Saint Petersburg State University
 of Aerospace Instrumentation
 (67 Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 30.05.2024

Поступила после рецензирования / Revised 25.06.2024

Принята к публикации / Accepted 18.08.2024