

УДК 621.396

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.41.2.028](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.41.2.028)

Особенности оценки средних характеристик рассеяния объектов

Т.В. Аветисян[✉], Я.Е. Львович, А.П. Преображенский

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация
vtatyana_avetisyan@mail.ru[✉]

Резюме. Целью работы является оценка возможности определения размеров идеально проводящего объекта – двумерного уголка с максимальными средними характеристиками рассеяния. На основе решения интегрального уравнения Фредгольма 1-го рода определялись характеристики вторичного рассеяния электромагнитных волн двумерного уголка. Эти характеристики представляли собой многоэкстремальную функцию, зависящую от размеров стороны уголка и длины его контура. Функция исследовалась с использованием метода сеток, а также метода локальной оптимизации – метода золотого сечения. В работе получены следующие новые результаты: определены зависимости размеров сторон уголка от длины контура для различных секторов углов наблюдения, дающие максимальное значение средних характеристик рассеяния, приведены значения коэффициентов полиномов, дающих приемлемую относительную ошибку аппроксимации полученных зависимостей. Представленный в работе алгоритм и полученные результаты могут быть в дальнейшем использованы при создании объектов, содержащих в своем составе уголки с заданными требованиями на средние характеристики рассеяния. Результаты работы могут быть обобщены для случая, когда в состав электродинамического объекта входит несколько уголков. В этом случае необходимо определять суммарное рассеянное поле с учетом разности фаз прихода электромагнитной волны от разных отражателей.

Ключевые слова: характеристики рассеяния, электромагнитные волны, оптимизация, управление электромагнитной обстановкой, аппроксимация характеристик.

Для цитирования: Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П. Особенности оценки средних характеристик рассеяния объектов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1321> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.028

The estimation of the average scattering characteristics of objects

T.V. Avetisyan[✉], Y.E. Lvovich, A.P. Preobrazhenskiy

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, Russian Federation
vtatyana_avetisyan@mail.ru[✉]

Abstract. The purpose of this paper is to assess the possibility of determining the size of a perfectly conducting object – a two-dimensional corner structure with a maximum average scattering characteristic. Based on the solution of Fredholm integral equation of the 1st kind, the scattering characteristics of electromagnetic waves of a two-dimensional corner structure were determined. These characteristics were the multiextremal functions depending on the size of the cylinder and the length of its contour. The function was researched by using the method of grids and local optimization method – the method of golden section. The following results were obtained: the dependencies of the corner structure size on the length of the contour for different sectors of observation angles that give the maximum value of the average characteristics of the scattering; the coefficients of polynomials, which give a reasonable approximation of the relative error of the obtained relationships were determined. The algorithm presented in this paper and the results can then be used to create objects that contain in their

composition corner structures with the specified requirements for the average characteristics of the scattering. The results of the study can be generalized for the case when several corners are included in the electrodynamic object. In that instance, it is necessary to determine the total scattered field with consideration to the phase difference in the arrival of an electromagnetic wave from different reflectors.

Keywords: characteristics of the scattering, electromagnetic waves, optimization, control of electromagnetic environment, approximation of characteristics.

For citation: Avetisyan T.V., Lvovich Y.E., Preobrazhenskiy A.P. The estimation of the average scattering characteristics of objects. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(2). URL: <https://moitvivr.ru/ru/journal/pdf?id=1321> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.41.2.028 (In Russ.).

Введение

Рассеиватели электромагнитных волн изучаются уже достаточно давно, поэтому разработаны различные методы для их анализа. В ряде случаев при рассмотрении электродинамических объектов достаточно использования простых моделей. Если рассеиватели характеризуются более сложной геометрией, то модели будут усложняться. При этом модели должны как можно более точно описывать те физические процессы, которые при этом будут протекать внутри анализируемых электродинамических объектов [1, 2]. В таких случаях будет происходить снижение уровня погрешностей в оцениваемых электродинамических параметрах. Во многих случаях, если меняется частота электромагнитной волны, направление ее движения, а также тип поляризации, это будет приводить к тому, что электродинамические характеристики также будут быстрым образом изменяться [3, 4].

Для разработки дифракционных структур и антенных систем могут быть использованы системы автоматизированного проектирования (САПР). Некоторые из них требуют достаточно больших вычислительных затрат. Связано это может быть с тем, что задачи решаются без учета особенностей структуры анализируемого электродинамического объекта [5, 6]. С другой стороны, разрабатываемые модели и алгоритмы, учитывающие структуру объекта, могут быть включены в математическое и алгоритмическое обеспечение САПР. Это позволит повысить эффективность осуществляемых расчетов [7, 8].

На практике в некоторых случаях представляет интерес проводить оценку не непосредственных характеристик рассеяния электромагнитных волн, а их средних значений [9, 10].

Цель данного исследования заключается в разработке методического подхода, алгоритма, позволяющего проводить определение размеров двумерной угловой структуры при требовании к экстремальным средним значениям рассеянной мощности в заданном диапазоне углов.

Методика. В ходе исследований мы будем рассматривать рассеяние радиоволн на 2D модели. Это, с одной стороны, позволит снизить размерность рассматриваемой задачи с точки зрения ее реализации на компьютере. С другой стороны, в дальнейшем результаты, а также сам методический подход могут быть обобщены для трехмерной модели. Пусть электромагнитная волна (ЭМВ) будет рассеиваться на двумерно идеально проводящей угловой структуре (Рисунок 1). Будем считать, что размер одной стороны этой структуры равен a , другой стороны равен L . Можно ввести для всего контура анализируемой структуры размер $L_a = a + L$. Будем рассматривать в качестве характерного размера длину a . Задача состоит в том, чтобы для условия достижения средней эффективной площади рассеяния (ЭПР) экстремальных значений определить соответствующие значения a и L_a . При этом обеспечивается указание на задание определенного сектора углов $\Delta\theta$, в которых будет происходить наблюдение. На Рисунке

1 видно, что отсчет угла θ будет происходить от нормали, которая будет проведена к стороне a угловой структуры.

На рисунке 1 используются следующие значения: a, L – размеры данной угловой структуры; β – угол раствора угловой структуры; θ – угол распространения плоской ЭМВ; E – вектор распространяющейся ЭМВ.

Мы считали в ходе проведения исследований, что углы падения ЭМВ могли меняться в достаточно широких пределах: $15^\circ \leq \Delta\theta \leq 90^\circ$. Для того, чтобы определить характеристики рассеяния, требовалось применение метода интегральных уравнений [9, 11]. Дадим пояснение, почему нами в таком случае был использован строгий метод в ходе осуществления расчетов:

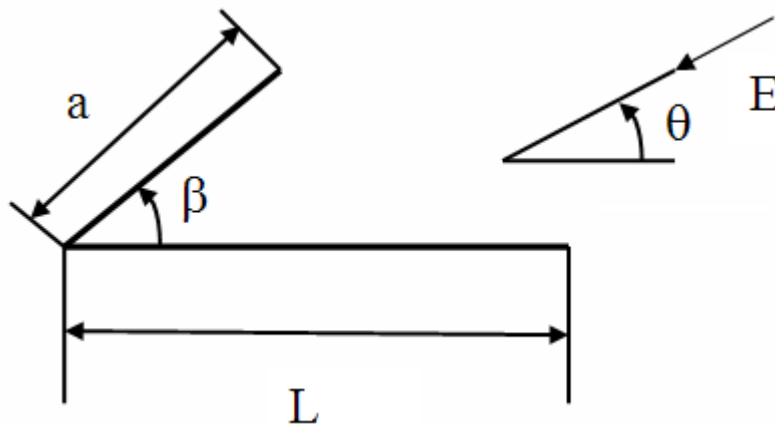


Рисунок 1 – Иллюстрация особенностей рассеяния ЭМВ на угловой структуре
Figure 1 – Illustration of EMV scattering features on an angular structure

1) на основе строгого метода можно осуществлять оценку характеристик рассеяния ЭМВ как в низкочастотной, так и резонансной области;

2) чем полезно использование строгого метода? Он позволяет проводить расчет характеристик рассеяния ЭМВ как для минимумов, так и для максимумов диаграммы обратного рассеяния. Такой подход может потребовать в некоторых случаях достаточно больших машинных ресурсов. Если используются приближенные аналитические методы, то приемлемые результаты получаются, в основном, если анализируются локальные максимумы в диаграмме обратного рассеяния. Можно получить ошибки до десятков дБ, если вести анализ по минимумам диаграмм обратного рассеяния [9, 11].

Рассматриваемая угловая структура будет возбуждаться полем падающей ЭМВ. Для того, чтобы определять рассеянную электромагнитную волну, необходимо определить плотность неизвестного электрического тока. Для него необходимо использовать уравнение Фредгольма первого рода. Если рассматривать случай Е-поляризации [3], то его можно записать таким образом:

$$\frac{\omega \cdot \mu}{4} \cdot \int_{\alpha}^{\beta} j(t) \cdot H_0^2[k \cdot L_0(\tau, t)] \cdot \sqrt{\xi'^2(t) + \eta'^2(t)} dt = E_z^0(\tau) \quad \alpha \leq \tau \leq \beta. \quad (1)$$

Напряженность электрического поля, которое относится к точке, лежащей на контуре, будет иметь продольную составляющую $E_z^0(\tau)$. Между точками интегрирования и наблюдения расстояние будет представляться следующим образом $L_0(\tau, t) = \sqrt{[\xi(\tau) - \xi(t)]^2 + [\eta(\tau) - \eta(t)]^2}$. С тем, чтобы описать контур угловой структуры, по которому будет осуществляться интегрирование, используем параметрическую форму: $x = \xi(t)$, $y = \eta(t)$, $\alpha \leq t \leq \beta$. Для формирования

интегрального уравнения потребуются первые производные, которые будут соответствовать рассматриваемым функциям $\xi'(t), \eta'(t)$, $k = 2 \cdot \pi/\lambda$, распространяющаяся электромагнитная волна имеет длину λ .

Применяется метод коллокаций, чтобы осуществить решение уравнения (1). Тогда мы приходим к системе линейных уравнений. После ее решения можно определить продольные электрические токи, у которых плотность

$$\vec{j} = \vec{z} \cdot j(t), \quad \alpha \leq t \leq \beta. \quad (2)$$

Для того, чтобы по угловой структуре определить двумерную ЭПР, необходимо использовать выражение

$$\sigma(\phi) = (60 \cdot \pi)^2 \cdot k \cdot |D(\phi)|^2. \quad (3)$$

Множитель вычисляется следующим образом

$$D(\phi) = \int_{\alpha}^{\beta} j(t) \cdot \sqrt{\xi'^2(t) + \eta'^2(t)} \cdot \exp(i \cdot k \cdot d(t, \phi)) dt$$

$$d(t, \phi) = \xi(t) \cdot \cos(\phi) + \eta(t) \cdot \sin(\phi).$$

Средняя ЭПР определяется таким образом

$$\bar{\sigma} = \sum_{i=0}^N \frac{\sigma(\theta_i)}{N+1}. \quad (4)$$

В нем $\sigma(\theta_i)$ рассматривается в виде величины ЭПР, которая будет соответствовать углу наблюдения θ_i .

Выделим ключевые шаги в рассматриваемой задаче:

1. Требуется задание сектора угла $\Delta\theta$, в котором осуществляется наблюдение распространения ЭМВ.

2. Проводится расчет значений рассеянного электромагнитного поля.

3. Для значений величины a необходимо определить значения величины L_a , соответствующее экстремальному значению средней ЭПР. Исследование показывает, что функция $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(a, L_a)$ является многоэкстремальной. Требовалось использование соответствующих оптимизационных подходов. Тогда, чтобы определить L_a , мы опирались на метод сеток [8]. В алгоритме осуществлялось последовательное сужение внутри области тех значений, которые подлежали определению. При этом метод золотого сечения, который является локальным подходом [8], применялся внутри каждого из участков сетки.

Результаты. На Рисунке 2 приведен пример расчета ЭПР для угловой структуры.

Кривая 1 соответствует размерам $a=8\lambda, L=10\lambda, \beta=30^\circ$, кривая 2 соответствует размерам $a=8\lambda, L=12\lambda, \beta=50^\circ$, кривая 3 соответствует размерам $a=6\lambda, L=11\lambda, \beta=60^\circ$.

На Рисунке 3 приведена зависимость числа обусловленности матрицы A линейных уравнений, получающаяся после применения метода коллокации к интегральному уравнению от числа элементов разбиения контура N . Рассматривался случай угловой структуры с размерами $a=6\lambda, L=6\lambda, \beta=60^\circ$.

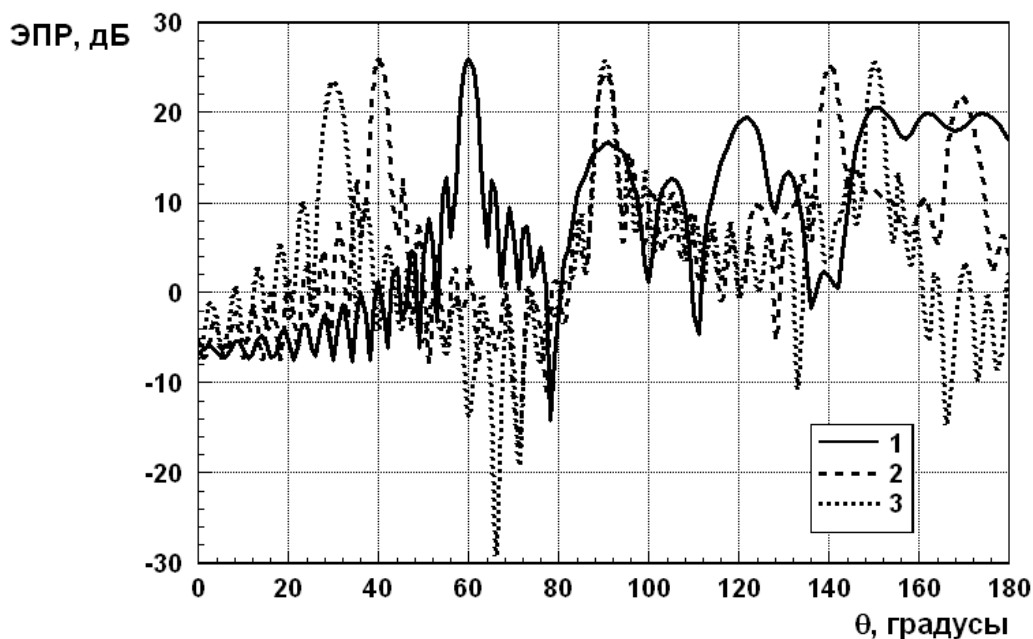


Рисунок 2 – Иллюстрация зависимости ЭПР угловой структуры от угла падения ЭМВ
Figure 2 – Illustration of the angular structure EPR dependence on the angle of EMV incidence

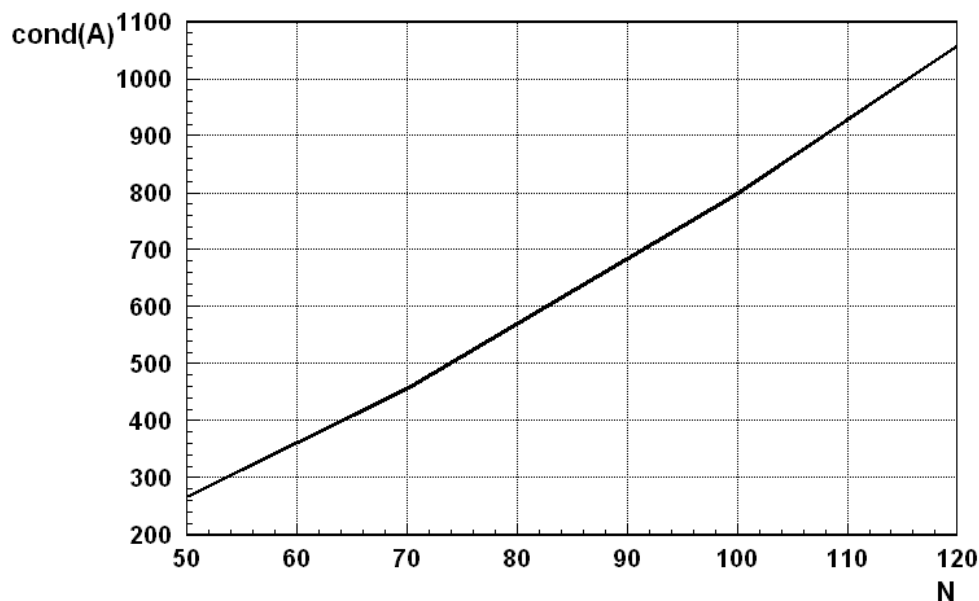


Рисунок 3 – Зависимость числа обусловленности матрицы от числа элементов разбиения контура N
Figure 3 – Dependence of the amount of matrix conditionality on the number of contour N partition elements

На Рисунке 4 дана иллюстрация зависимости общей длины контура L_a угловой структуры от значения характерного размера, который позволяет обеспечить экстремальное значение средней ЭПР $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(a, L_a)$. Приведены результаты, которые соответствуют различным диапазонам, в которых изменялись углы наблюдения $\Delta\theta$.

Для удобства воспроизведения полученных зависимостей a от L_a была поставлена задача проведения их аппроксимации при помощи полиномиальных зависимостей. Для этого оказалось удобно использовать метод наименьших квадратов

[12]. Степень аппроксимирующего полинома n менялась в пределах от 1 до 4*. На Рисунке 5 показано, какая при этом будет получаться относительная ошибка линейной аппроксимации. Оценки приводились для разных диапазонов, в которых происходило изменение угла падения ЭМВ.

Анализ показывает, что в ходе аппроксимации значение максимальной ошибки получается в случае, если диапазон углов падения ЭМВ будет лежать в пределах $\Delta\theta \leq 15^\circ$ для большинства значений степени полинома. Значение ошибки будет приемлемым с точки зрения практики (когда относительная ошибка не превышает 5 %) в случае, когда диапазон углов наблюдения $15^\circ \leq \Delta\theta \leq 90^\circ$, с учетом того, что степень аппроксимирующего полинома $n \geq 4$.

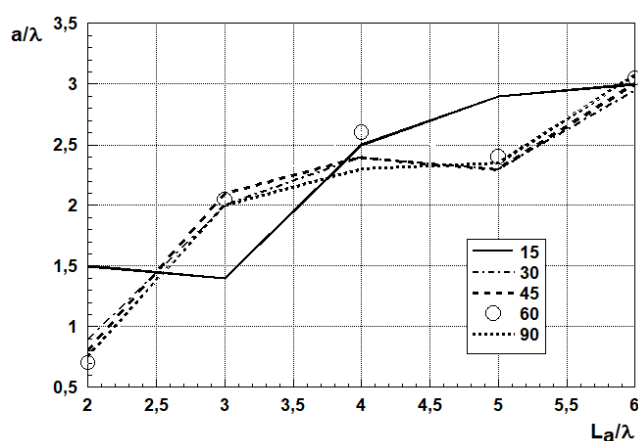


Рисунок 4 – Иллюстрация зависимости общей длины контура угловой структуры L_a от характерного размера a с учетом экстремального значения средней ЭПР для диапазона углов $\Delta\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

Figure 4 – Illustration of the angular structure L_a total contour length dependence on the characteristic size of a taking into account the extreme value of the average EPR for a range of angles $\Delta\theta = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ$

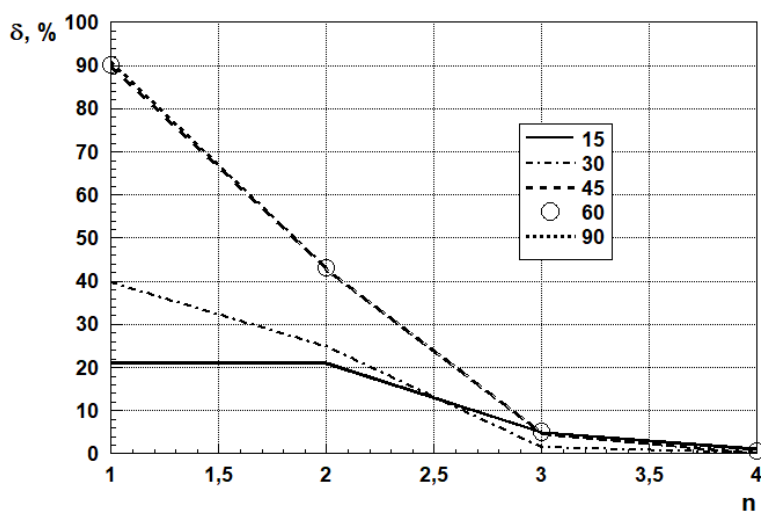


Рисунок 5 – Иллюстрация зависимости относительной ошибки полиномиальной аппроксимации от степени n аппроксимирующего полинома для разных диапазонов углов падения ЭМВ

Figure 5 – Illustration of the polynomial approximation relative error dependence on the degree n of the approximating polynomial for different ranges of EMV incidence angles

В Таблице 1 приведены значения коэффициентов аппроксимирующего полинома $y(x) = \sum_{i=0}^n b_i x^i$ (при $n=7$) для различных диапазонов углов падения ЭМВ.

Таблица 1 – Значения коэффициентов аппроксимирующего полинома для различных диапазонов углов падения ЭМВ

Table 1 – Values of approximating polynomial coefficients for different ranges of EMF incidence angles

	$\Delta\theta = 15^\circ$	$\Delta\theta = 30^\circ$	$\Delta\theta = 45^\circ$	$\Delta\theta = 60^\circ$	$\Delta\theta = 90^\circ$
b_0	24.4	1.05	3.15	3.15	3.15
b_1	-26.092	-3.021	-6.379	-6.379	-6.379
b_2	10.254	2.456	4.11	4.11	4.11
b_3	-1.658	-0.579	-0.896	-0.896	-0.896
b_4	0.096	0.044	0.065	0.065	0.065

Таким образом, в алгоритме можно выделить следующие основные шаги:

1. Задается размер характерного размера угловой структуры и диапазон углов $\Delta\theta$, в которых будет процесс распространения ЭМВ.
2. Проводится расчет характеристик рассеяния на основе метода интегральных уравнений.
3. Проводится расчет коэффициентов аппроксимирующего полинома по требуемому значению $\Delta\theta$.
4. Осуществляется расчет L_a применением аппроксимирующего полинома.

В состав объекта могут входить N отражателей [11, 13]. Будем считать, что они не будут между собой взаимодействовать. Тогда, чтобы провести оценку для общей ЭПР такой совокупности, требуется учитывать значения ЭПР каждого из отражателей σ_i . Поскольку отражатели находятся на некоторых расстояниях друг от друга, необходимо учесть разность фаз электромагнитных волн [9]. Тогда получаем выражение:

$$\sigma = \sum_{i=1}^N \sigma_i + 2 \cdot \sum_{i>j}^N \sqrt{\sigma_i \cdot \sigma_j} \cos \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta r_{ij}, \quad (5)$$

Учитывается, что $\Delta r_{ij} = r_i - r_j$, при этом r_i – расстояние, которое будет между центром соответствующего i -го отражателя и точкой, в которой осуществляется наблюдение.

Каким образом определить максимальную среднюю ЭПР совокупности отражателей? Используя (5), получаем такое выражение:

$$\sigma_{\max} = \sum_{i=1}^N \sigma_{\max i} + 2 \cdot \sum_{i>j}^N \sqrt{\sigma_{\max i} \cdot \sigma_{\max j}} \cos \frac{4 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \Delta r_{ij}. \quad (6)$$

Заключение

В работе изучены рассеивающие свойства угловых электродинамических структур, которые могут входить в состав антенн и технических объектов. Разработан комплексный подход, базирующийся на комбинации метода интегральных уравнений и методов оптимизации. Проведена аппроксимация полученных результатов. Представленный в данной работе алгоритм, а также полученные на его основе результаты могут быть полезны с точки зрения проектирования объектов, для которых существуют заданные требования относительно средних характеристик рассеяния.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гарбузов В.В., Шабров С.А. Априорные оценки решения краевой задачи. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;1(40):15–18.
2. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Об анализе эффективности идентификации атак на беспроводные сенсорные сети. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;3(42):107–109.
3. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Проблемы обеспечения информационной безопасности в беспроводных сенсорных сетях. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;3(42):103–106.
4. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Анализ особенностей современных беспроводных сенсорных сетей. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;3(42):99–102.
5. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Анализ характеристик современных IP-сетей связи. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;3(42):64–67.
6. Преображенский Ю.П. Информационная безопасность – вызовы современного мира. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2017;2(21):60–63.
7. Львович Я.Е., Преображенский Ю.П., Ружицкий Е. Анализ особенностей приема и передачи сигналов в компьютерных сетях. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;1(40):75–78.
8. Бейко И.В., Бублик Б.Н., Зинько П.Н. *Методы и алгоритмы решения задач оптимизации*. Киев: Вища школа; 1983. 511 с.
9. Захаров Е.В., Пименов Ю.В. *Численные методы решения задач дифракции*. М.: Радио и связь; 1986. 184 с.
10. Кобак В.О. *Радиолокационные отражатели* М.: Сов. радио; 1972. 248 с.
11. Половко А.М., Бутусов П.Н. *Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации*. СПб.: БХВ-Петербург; 2004. 320 с.
12. Уфимцев П.Я. *Метод краевых волн физической теории дифракции* М.: Сов. радио; 1962. 243 с.

REFERENCES

1. Garbuzov V.V., Shabrov S.A. A priori estimations of the solution of the boundary value problem. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;1(40):15–18. (In Russ.).
2. Lvovich Y.E., Preobrazhenskiy Y.P., Ruzhitskiy E. On analysis of efficiency of identification of attacks on wireless sensor networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;3(42):107–109. (In Russ.).
3. Lvovich Y.E., Preobrazhenskiy Y.P., Ruzhitskiy E. Problems of ensuring information security in wireless sensor networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;3(42):103–106. (In Russ.).
4. Lvovich Y.E., Preobrazhenskiy Y.P., Ruzhitskiy E. Analysis of peculiarities of modern wireless sensor networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;3(42):99–102. (In Russ.).
5. Lvovich Y.E., Preobrazhenskiy Yu.P., Ruzhitskiy E. Analysis of characteristics of modern IP-networks of communication. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of Voronezh institute of high technologies*. 2022;3(42):64–67. (In Russ.).

6. Preobrazhensky Y.P. Information security – the challenges of the modern world. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2017;2(21):60–63. (In Russ.).
7. Lvovich J.E., Preobrazhensky Y.P., Ruzhitsky E. Analysis of peculiarities of signal reception and transmission in computer networks. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;1(40):75–78. (In Russ.).
8. Beiko I.B. Bublik B.N., Zinko P.N. *Methods and algorithms of solving optimization problems*. Kiev: Vishcha shkola; 1983. 511 p. (In Russ.).
9. Zakharov E.V., Pimenov Yu.V. *Numerical methods for solving of diffraction tasks – Moscow: Radio and Communications; 1986. 184 p. (In Russ.)*.
10. Kobak V.O. *Radiolocation reflectors*. M.: Soviet Radio; 1972. 248 p. (In Russ.).
11. Polovko A.M., Butusov P.N. *Interpolation. Methods and computer technologies of their realization*. SPb: BXW-Petersburg; 2004. 320 p. (In Russ.).
12. Ufimtsev. P.I. *The Method of Marginal Waves in Physical Diffraction Theory*. Moscow: Sov. Radio; 1962. 243 p. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аветисян Татьяна Владимировна, Tatiana Vladimirovna Avetisyan, Lecturer, преподаватель, Колледж Воронежский College of Voronezh Institute of High институт высоких технологий, Воронеж, Technologies, Voronezh, the Russian Federation. Российская Федерация.
e-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru
ORCID: [0000-0003-3559-6070](https://orcid.org/0000-0003-3559-6070)

Львович Яков Евсеевич, Yakov Evseevich Lvovich, Doctor of Technical технических наук, профессор, Воронежский Sciences, Professor, Voronezh Institute of High институт высоких технологий, Воронеж, Technologies, Voronezh, the Russian Federation. Российская Федерация.
e-mail: office@vvt.ru
ORCID: [0000-0002-7051-3763](https://orcid.org/0000-0002-7051-3763)

Преображенский Андрей Петрович, Andrey Petrovich Preobrazhenskiy, Doctor of технических наук, профессор, Воронежский Technical Sciences, Professor, Voronezh институт высоких технологий, Воронеж, Institute of High Technologies, Voronezh, the Российская Федерация. Russian Federation.
e-mail: app@vvt.ru
ORCID: [0000-0002-6911-8053](https://orcid.org/0000-0002-6911-8053)

Статья поступила в редакцию 09.03.2023; одобрена после рецензирования 25.04.2023; принята к публикации 21.06.2023.

The article was submitted 09.03.2023; approved after reviewing 25.04.2023; accepted for publication 21.06.2023.