

УДК 621.396

DOI: [10.26102/2310-6018/2024.46.3.006](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2024.46.3.006)

Моделирование рассеяния электромагнитных волн на структурах в виде куба

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

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. На сегодняшний день среди различных прикладных задач в электродинамике можно отметить разработку различных подходов, направленных на оценку и исследование характеристик рассеяния различных электродинамических объектов. Среди них можно выделить трехмерные объекты, в составе которых выделяются плоские поверхности и угловые структуры. Их вклад в уровни электромагнитных полей в определенных направлениях может быть достаточно заметным. Для того, чтобы корректным образом осуществлять решение проблемы рассеяния характеристик рассеяния электромагнитных волн, требуется опираться на соответствующие методы. При этом необходимо минимизировать возможные ошибки, но рассматриваемую трехмерную задачу требуется решать за относительно небольшое время. В данной работе проводится построение методики, связанной с определением характеристик рассеяния структуры в виде куба. Это связано с тем, что подобные структуры входят в состав большого числа современных технических объектов, данное замечание необходимо учитывать в ходе их проектирования. Для решения поставленной задачи был выбран метод интегральных уравнений. Представлены результаты проведенного моделирования. Проводится сравнение с экспериментальными данными, показано, что решение сходится. Также проведено сравнение с характеристиками куба Гюйгенса.

Ключевые слова: численное моделирование рассеяния, дифракция электромагнитных волн, структура в виде куба, интегральное уравнение, куб Гюйгенса.

Для цитирования: Преображенский А.П., Львович Я.Е., Аветисян Т.В., Преображенский Ю.П. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на структурах в виде куба. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1548> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.006

Modeling the scattering of electromagnetic waves on structures in the form of a cube

A.P. Preobrazhenskiy, Ya.E. Lvovich, T.V. Avetisyan✉, Yu.P. Preobrazhenskiy

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. To date, among the various applied tasks in electrodynamics, it is possible to note the development of various approaches aimed at evaluating and studying the scattering characteristics of various electrodynamic objects. Among them, three-dimensional objects can be distinguished, which include flat surfaces and angular structures. Their contribution to the levels of electromagnetic fields in certain directions can be quite noticeable. In order to correctly solve the problem of scattering of electromagnetic wave scattering characteristics, it is necessary to rely on appropriate methods. At the same time, it is necessary to minimize possible errors, but the three-dimensional problem in question needs to be solved in a relatively short time. In this paper, the construction of a technique related to the determination of the scattering characteristics of a structure in the form of a cube is carried out. This is due to the fact that such structures are part of a large number of modern technical facilities, this must be taken into account during their design. To solve this problem, the method of integral equations was chosen. The results of the simulation are presented. A comparison with experimental data is carried out,

and it is shown that the solution converges. A comparison with the characteristics of the Huygens cube is also carried out.

Keywords: numerical simulation of scattering, diffraction of electromagnetic waves, cube structure, integral equation, Huygens cube.

For citation: Preobrazhenskiy A.P., Lvovich Ya.E., Avetisyan T.V., Preobrazhenskiy Yu.P. Modeling the scattering of electromagnetic waves on structures in the form of a cube. *Modeling, optimization and information technology*. 2024;12(3). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1548> DOI: 10.26102/2310-6018/2024.46.3.006 (In Russ.).

Введение

Вопросы, связанные с оценкой радиолокационных характеристик (РЛХ) (например, эффективной площадью рассеяния (ЭПР) и др.) объектов, имеющих сложную форму, представляют интерес для специалистов по нескольким причинам. Это уменьшение вторичного электромагнитного излучения, распознавание объектов и др. [1, 2].

При определении РЛХ объектов сложной формы на практике необходимо использовать различные математические методы, в том числе их комбинации. Конкретный метод расчета должен быть выбран, исходя из конкретных условий. Например, требуется учитывать то, какая электродинамическая задача рассматривается – двумерная или трехмерная, есть ли на поверхности металлического тела магнито-диэлектрические включения, какими аппаратными и программными ресурсами обладает исследователь (объемы машинной памяти, для оценок электродинамических характеристик необходимое машинное время и др.) [3].

Для электродинамических структур сложной формы, чтобы реализовывать процессы моделирования, к настоящему времени, как показывает анализ, разработчиками создано достаточно большое число методов. Для выпуклых тел применяют метод физической оптики или метод интегральных уравнений. Для тел, содержащих полые структуры, применяют модальный метод, метод конечных элементов, метод интегральных уравнений, гранично-интегральный метод. Для тел, содержащих различные кромки, клинья, эффективно используется метод краевых волн. На основании анализа различных литературных источников предлагается в качестве элемента, входящего в состав тела сложной формы рассматривать куб. Когда рассматривается куб, то в нем можно отметить ключевые особенности, относящиеся к трехмерному рассеивающему объекту [4]. При этом существуют многогранные взаимодействия и дифракция на углах такого объекта. Она оказывает влияние на то, как в различных плоскостях будет происходить создание двухпозиционных ЭПР (в дальней зоне) [5]. Помимо этого, дифракцию на ребре куба можно рассматривать как рассеяние электромагнитных волн на трехмерной кромке (клине). Такая кромка может входить в состав тела сложной формы и вносить заметный вклад в рассеянную электромагнитную волну.

Целью работы является разработка методики расчета рассеяния электромагнитных волн на кубе.

Методика расчета

Анализ РЛХ предлагается проводить на основе интегральных уравнений. Наш выбор можно обосновать тем, что это строгий метод и в его рамках можно определять ЭПР для тел, размеры которых близки к длине волны ($\sim 1 \div 2\lambda$), тогда рассматривается так называемая резонансная область. Для таких размеров нельзя проводить расчет на основании метода физической оптики, требуется применение строгого метода. Также

метод интегральных уравнений удобен тем, что при его использовании, если происходит небольшое изменение формы тела, достаточно осуществить изменение в контуре интегрирования в применяемом алгоритме решения задачи [6, 7].

Таким образом, предлагается методика расчета характеристик рассеяния электромагнитных волн. В ней можно выделить соответствующие шаги:

1. На различных гранях идеально проводящего куба требуется найти электрические токи. Основой для расчета является интегральное уравнение Фредгольма второго рода

$$J_s(r) = 2n \times H^i(r) + \frac{1}{2\pi} n \times \int_s J_s(r) \times \text{grad}' G ds' . \quad (1)$$

Для свободного пространства $G = \exp(-jkr)/r$ использовалась функция Грина. Это связано с тем, что учитывались все три компоненты электромагнитного поля. Куб является выпуклым объектом, интегрирование ведется по его поверхности s . Выбирая некоторую точку на такой поверхности, можно провести к ней внешнюю нормаль n .

Выделяя элементарную площадку на металлической поверхности, мы можем для электрического тока сделать расчет поверхностной плотности таким образом $J_s = [n \times H]$. На металлический куб происходит падение плоской электромагнитной волны. В трехмерном базисе она записывается следующим образом $H^i(r) = xH_x^i + yH_y^i + zH_z^i$. Рассматриваемая волна может иметь разную поляризацию.

2. Плотность электрического тока J_s требуется для расчета рассеянных полей. При этом аналитическое решение (1) весьма сложно найти, а иногда это сделать просто невозможно. Численные методы в подобных случаях могут быть эффективным образом использованы. Мы предлагаем опираться на метод коллокаций. Происходит разложение компонент тока J_x, J_y, J_z на основе системы базисных функций, которые задаются на поверхности куба:

В качестве базисных функций нами применялись кусочно-постоянные функции. Это позволяет заметным образом провести упрощение анализируемой задачи:

$$f(x) = \begin{cases} f_0(x), & x < x_1 \\ f_1(x), & x_1 < x < x_2. \\ f_n(x), & x_n < x \end{cases} \quad (2)$$

В качестве пробных функций были использованы δ -функции Дирака. В ходе численного моделирования указанное выше по координатное выражение умножалось на данные функции. После этого, за счет интегрирования по поверхности куба, в результате применения метода коллокаций мы перейдем от уравнения (1) к такой системе

$$\begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

При ее решении для трехмерного случая на поверхности куба будут определены составляющие плотности электрического тока J_x, J_y, J_z . Видно, что произошло преобразование интегрального уравнения к координатной форме. Выбор шага коллокаций определяется необходимой точностью расчетов. Если рассматриваются грубые оценки, то шаг сетки менее $\lambda/8$; если требуется проведение инженерных расчетов, то шаг сетки менее $\lambda/16$. Когда рассматриваются радиальные направления радиус-вектора r , то, если куб будет обладать большими электрическими размерами, будет наблюдаться автоматическая отсечка тока. В этой связи шаг сетки в методе коллокаций выбирается для указанных выше ограничений. Для периферийных областей не будет существенного влияния тока на характеристики рассеяния. В этой связи по мере того,

как происходит увеличение расстояния от центра граней куба, можно осуществлять увеличение шага сетки без существенного падения точности расчетов [8, 9]. Также следует отметить, что существует интегрируемая особенность для ядер интегралов, когда рассматриваются скалярные интегральные уравнения. Она соответствует случаю, в котором будут совпадать точки интегрирования и наблюдения. Система (3) решается на основе численных методов. Обозначенные блоки U будут вычисляться на основе следующих выражений:

$$\begin{aligned}(U_{xx})_{mn} &= \frac{1}{2\pi} \int_S ((n_y)_m (grad'_y)_{mn} + (n_z)_m (grad'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \\(U_{xy})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi} \int_S ((n_y)_m (grad'_x)_{mn}) ds'_n; (U_{xz})_{mn} = -\frac{1}{2\pi} \int_S ((n_z)_m (grad'_x)_{mn}) ds'_n; \\(U_{yx})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi} \int_S ((n_x)_m (grad'_y)_{mn}) ds'_n; (U_{yz})_{mn} = -\frac{1}{2\pi} \int_S ((n_z)_m (grad'_y)_{mn}) ds'_n; (4) \\(U_{yy})_{mn} &= \frac{1}{2\pi} \int_S ((n_x)_m (grad'_x)_{mn} + (n_z)_m (grad'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \\(U_{zx})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi} \int_S ((n_x)_m (grad'_x)_{mn}) ds'_n; (U_{zy})_{mn} = -\frac{1}{2\pi} \int_S ((n_y)_m (grad'_z)_{mn}) ds'_n; \\(U_{zz})_{mn} &= \frac{1}{2\pi} \int_S ((n_x)_m (grad'_x)_{mn} + (n_y)_m (grad'_y)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn},\end{aligned}$$

где $m, n = 1, \dots, N$, где N – число участков, на которые разбивается поверхность куба. Здесь $\delta_{mn}=0$ при различных m и n , $\delta_{mn} = 1$ при $m = n$,

$$grad G_{mn} = -\hat{r}_{mn} \frac{1+jkr}{r_{mn}^2} exp(-jkr_{mn}) = i(grad_x)_{mn} + j(grad_y)_{mn} + k(grad_z)_{mn}, \quad (5)$$

в указанных выражениях, таким образом, определялся градиент функции Грина.

Система уравнений (3), которая получилась в результате применения метода коллокаций:

$$\begin{aligned}(R_x)_m &= 2((n_y)_m (H_z^i)_m - (n_z)_m (H_y^i)_m); (R_y)_m = -2((n_x)_m (H_z^i)_m - (n_z)_m (H_x^i)_m); \\(R_z)_m &= 2((n_x)_m (H_y^i)_m - (n_y)_m (H_x^i)_m).\end{aligned} \quad (6)$$

Пусть найдены составляющие электрических токов $J_s(r)$ на поверхности металлического куба после решения системы уравнений (1). Чтобы определить электромагнитное поле в дальней зоне применяем выражение:

$$H^{sc}(r) = \frac{j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} exp(-jkr)}{4\pi r} \int_S J_s(r') \times \hat{r} exp(jk\hat{r}r') ds', \quad (7)$$

где $k=2\pi/\lambda$; r' – соответствует радиус-вектору точки, которая связана с источником; r – соответствует радиус-вектору точки наблюдения, которая связана с дальней зоной. $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ – магнитная и электрическая постоянная.

ЭПР куба будет определяться следующим образом:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|H^{sc}(r)|^2}{|H^i(r)|^2}. \quad (8)$$

Результаты

На основе предлагаемой методики проводилось сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными [10] (размер грани куба $a=0,755\lambda$ для случая Е и Н

поляризации). На Рисунке 1 показаны результаты расчетов 1 (сплошная линия) – Е-поляризация, расчет, результаты 2 (окружности) – Е-поляризация, эксперимент, результаты расчетов 3 (штриховая линия) – Н-поляризация, расчет, результаты 4 (треугольники) – Н-поляризация, эксперимент.

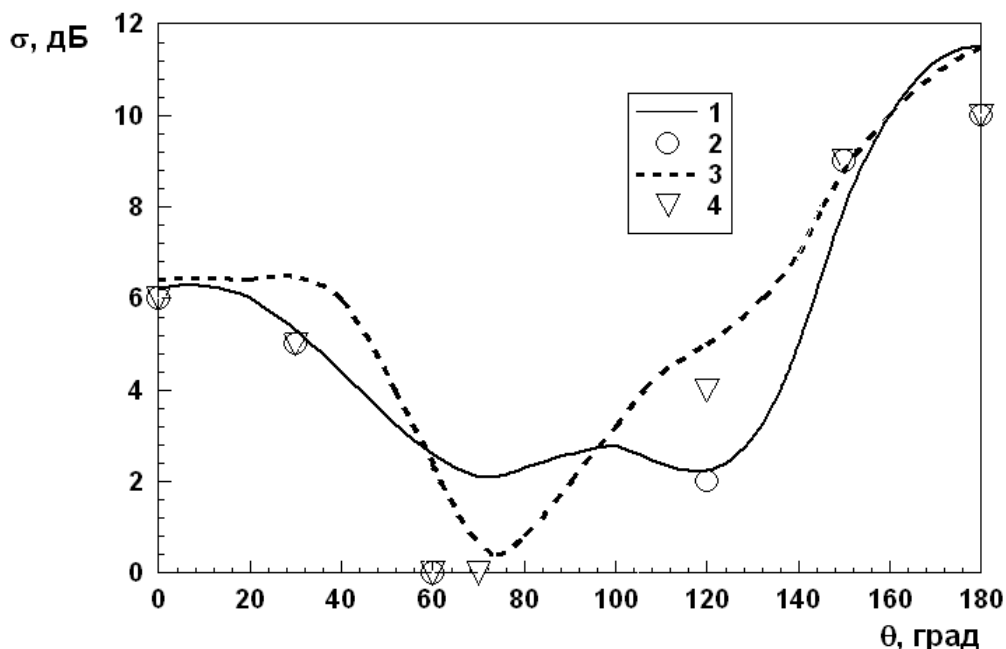


Рисунок 1 – Зависимости эффективной площади рассеяния от угла наблюдения при $a=0,755\lambda$
Figure 1 – The dependence of the effective scattering area on the viewing angle at $a=0.755\lambda$

Анализ показывает, что результаты теории и эксперимента отличаются не более, чем на 2 дБ, что укладывается в экспериментальную погрешность.

На Рисунке 2 приведены результаты расчетов ЭПР (моностатической и бистатической) для куба с шириной грани $a=1,5\lambda$. Наблюдалась хорошая сходимость решения. Результаты расчетов 1 (сплошная линия) – Е-поляризация, расчет, бистатический случай при шаге $0,375\lambda$, результаты расчетов 2 (пунктирная линия) – Е-поляризация, расчет, бистатический случай при шаге $0,1\lambda$, результаты расчетов 3 (штриховая линия) – Е-поляризация, моностатический случай, при шаге $0,375\lambda$, результаты расчетов 4 (штрихпунктирная линия) – Е-поляризация, расчет, моностатический случай при шаге $0,1\lambda$, результаты расчетов 5 (черные треугольники) – Е-поляризация, оценка на основе физической оптики, моностатический случай.

Проведенный анализ результатов продемонстрировал сходимость решения, методикой можно пользоваться при достаточно малом шаге разбиения.

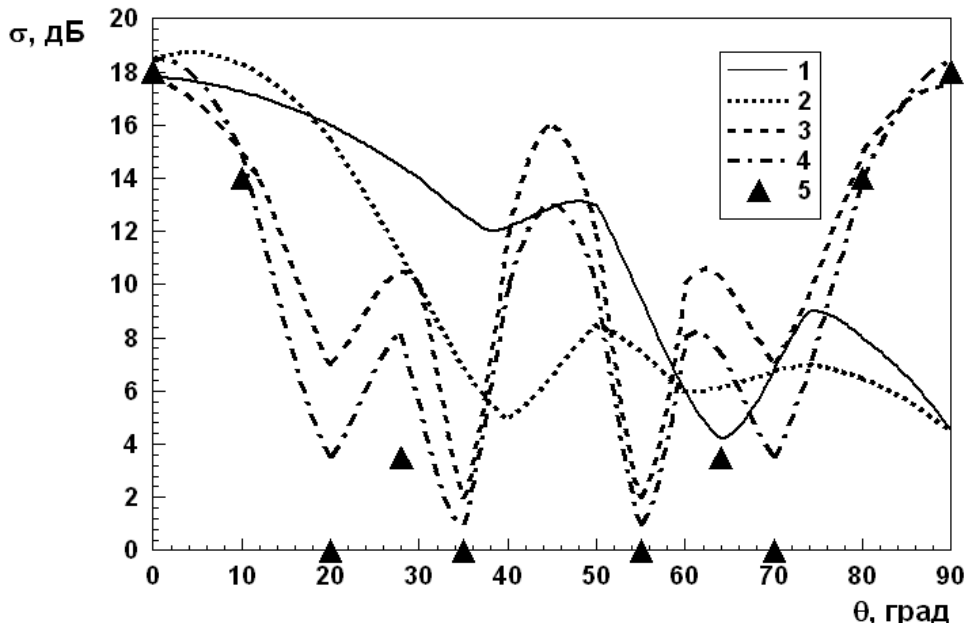


Рисунок 2 – Зависимости эффективной площади рассеяния от угла наблюдения при $a=1,5\lambda$
Figure 2 – The dependence of the effective scattering area on the viewing angle at $a=1.5\lambda$

В рамках предлагаемого подхода возможен расчет для более общего случая – параллелепипеда с длиной ребер a, b, c .

На Рисунке 3 представлена зависимость коэффициента усиления, который соответствует кубу Гюйгенса от частоты. Рассматривался куб Гюйгенса, каждое ребро которого было равно 1 мм. Результаты расчетов 1 (окружности) соответствуют данным из работы [11], результаты расчетов 2 (треугольники) соответствуют расчету на основе разработанной нами модели. Результаты отличаются не более, чем на 2 дБ, то есть предлагаемая методика может использоваться при расчетах коэффициента усиления.

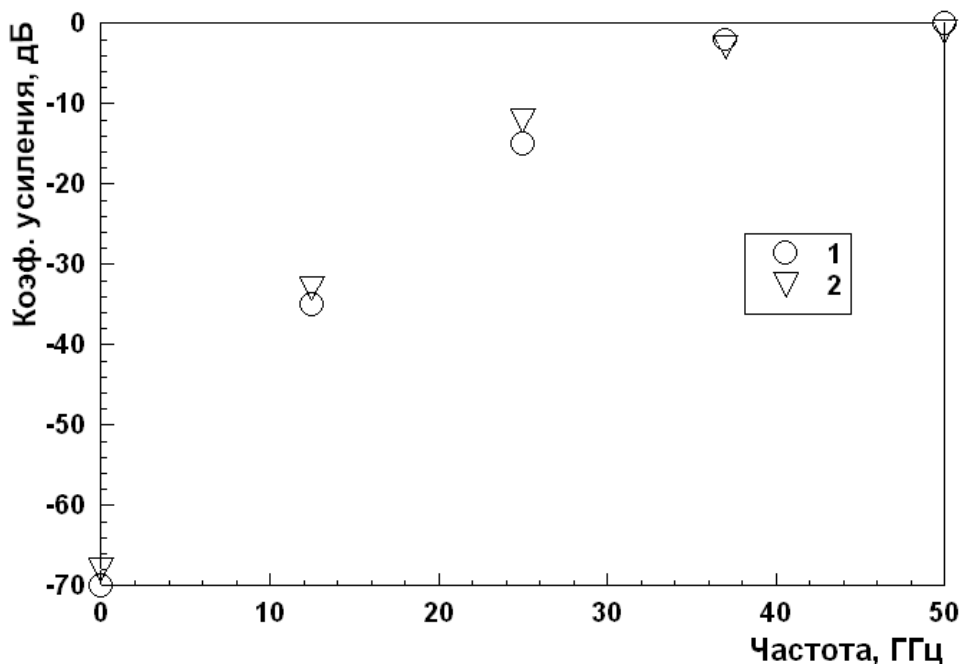


Рисунок 3 – Оценка коэффициента усиления куба Гюйгенса
Figure 3 – Estimation of the Huygens cube gain

Заключение

В состав технических объектов со сложной формой могут входить различные элементы, имеющие плоские поверхности, например параллелепипеды. Частным случаем параллелепипеда является куб. Для обеспечения необходимого уровня отраженного поля необходимо осуществлять процессы моделирования рассеяния электромагнитных волн на таких объектах. В работе предложена методика расчета ЭПР куба в резонансной области. Достоинством данной методики является то, что в ее рамках возможен расчет в тех случаях, когда нельзя применить физическую оптику. Проведены расчеты характеристик рассеяния для различных размеров идеально проводящего куба. Представлены характеристики куба Гюйгенса. Результаты работы могут быть полезны при обеспечении снижения электромагнитной заметности, решения задач, связанных с электромагнитной совместимостью.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Грибков А.С. и др. *Радиолокационные характеристики объектов: методы исследования*. Москва: Радиотехника; 2015. 311 с.
Gribkov A.S. et al. *Radiolokatsionnye kharakteristiki ob"ektov: metody issledovaniya*. Moscow: Radiotekhnika; 2015. 311 p. (In Russ.).
2. Газизов Т.Р., Заболоцкий А.М., Куксенко С.П., Комнатнов М.Е., Суровцев Р.С. Моделирование элементов критичной радиоэлектронной аппаратуры: новые подходы, модели и алгоритмы, их реализация и применение. *Наноиндустрия*. 2020;13(S4):366–369. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.366.369>
Gazizov T.R., Zabolotsky A.M., Kuksenko S.P., Komnatnov M.E., Surovtcev R.S. Simulation of Radioelectronic Equipment Elements: New Approaches, Models, and Algorithms, Their Implementation and Application. *Nanoindustriya = Nanoindustry*. 2020;13(S4):366–369. (In Russ.). <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2020.13.4s.366.369>
3. Весник М.В. Физическая интерпретация математически строгого решения задачи дифракции при помощи эвристических формул. *Современная математика. Фундаментальные направления*. 2016;62:32–52.
Vesnik M.V. Physical Interpretation of a Mathematical Strict Solution for the Diffraction Problem by Means of Heuristic Formulas. *Sovremennaya matematika. Fundamental'nye napravleniya = Contemporary Mathematics. Fundamental Directions*. 2016;62:32–52. (In Russ.).
4. Весник М.В. Построение эвристических дифракционных коэффициентов в аналитических решениях задач рассеяния волновых полей разной физической природы на плоских многоугольных пластинах со сложными граничными условиями. *Радиотехника и электроника*. 2014;59(6):543–551. <https://doi.org/10.7868/S003384941405009X>
Vesnik M.V. Construction of heuristic diffraction coefficients in the analytical solutions to the problems in which wave fields of different physical nature are scattered by polygonal flat plates with complex boundary conditions. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2014;59(6):496–503. <https://doi.org/10.1134/S106422691405009X>
5. Клименко Ю.А., Преображенский А.П. Проблемы управления сложным электродинамическим объектом. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2022;16(3):9–12.

- Klimenko Yu.A., Preobrazhenskiy A.P. The control challenges of complex electrodynamic object. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2022;16(3):9–12. (In Russ.).
6. Львович И.Я., Львович Я.Е., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П., Чопоров О.Н. Исследование характеристик сложных дифракционных структур на основе комбинированного подхода. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):49–62. <https://doi.org/10.15826/urej.2021.5.1.004>
Lvovich I.Ya., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P., Choporov O.N. Investigation of the characteristics of complex diffractive structures based on a combined approach. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):49–62. (In Russ.). <https://doi.org/10.15826/urej.2021.5.1.004>
7. Львович К.И. Некоторые особенности лучевых моделей в беспроводных системах связи. В сборнике: *Наука молодых – будущее России: Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: Том 4, 12-13 декабря 2022 года, Курск, Россия*. Курск: Юго-Западный государственный университет; 2022. С. 191–193.
L'vovich K.I. Nekotorye osobennosti luchevykh modelei v besprovodnykh sistemakh svyazi. In: *Nauka molodykh – budushchee Rossii: Sbornik nauchnykh statei 7-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh: Volume 4, 12-13 December 2022, Kursk, Russia*. Kursk: Southwest State University; 2022. pp. 191–193. (In Russ.).
8. Львович К.И. О некоторых особенностях проектирования беспроводных систем связи. В сборнике: *Наука молодых – будущее России: Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции перспективных разработок молодых ученых: Том 4, 12-13 декабря 2022 года, Курск, Россия*. Курск: Юго-Западный государственный университет; 2022. С. 188–191.
L'vovich K.I. O nekotorykh osobennostyakh proektirovaniya besprovodnykh sistem svyazi. In: *Nauka molodykh – budushchee Rossii: Sbornik nauchnykh statei 7-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh: Volume 4, 12-13 December 2022, Kursk, Russia*. Kursk: Southwest State University; 2022. pp. 188–191. (In Russ.).
9. Львович К.И., Плотников А.А. О проблемах обработки данных рассеяния объектов. В сборнике: *Молодежь и системная модернизация страны: Сборник научных статей 7-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых: В 5-ти томах: Том 3, 19-20 мая 2022 года, Курск, Россия*. Курск: Юго-Западный государственный университет; 2022. С. 401–403.
L'vovich K.I., Plotnikov A.A. O problemakh obrabotki dannykh rasseyaniya ob"ektov. In: *Molodezh' i sistemnaya modernizatsiya strany: Sbornik nauchnykh statei 7-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii studentov i molodykh uchenykh: V 5-ti tomakh: Volume 3, 19-20 May 2022, Kursk, Russia*. Kursk: Southwest State University; 2022. pp. 401–403. (In Russ.).
10. Пенно Р.П., Тилле Г.А., Пасала К.М. Рассеяние на идеально проводящем кубе. *ТИИЭР*. 1989;77(5):195–204.
Penno R.P., Tillet G.A., Pasala K.M. Scattering on an ideally conducting cube. *TIIER = TIYER*. 1989;77(5):195–204. (In Russ.).
11. Годин А.С., Цай А.Б., Климов К.Н. Численное электродинамическое исследование внешнего куба Гюйгенса. *Радиотехника и электроника*. 2015;60(5):468–485. <https://doi.org/10.7868/S0033849415050046>

Godin A.S., Tsai A.B., Klimov K.N. Numerical electrodynamic analysis of the external Huygens cube. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2015;60(5):436–453. <https://doi.org/10.1134/S1064226915050046>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: app@vvt.ru

ORCID: [0000-0002-6911-8053](https://orcid.org/0000-0002-6911-8053)

Andrey P. Preobrazhensky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: office@vvt.ru

ORCID: [0000-0002-7051-3763](https://orcid.org/0000-0002-7051-3763)

Yakov E. Lvovich, Doctor of Technical Sciences Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Аветисян Татьяна Владимировна, преподаватель, Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru

ORCID: [0000-0003-3559-6070](https://orcid.org/0000-0003-3559-6070)

Tatiana V. Avetisyan, Lecturer, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Преображенский Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: petrovich@vvt.ru

Yuri P. Preobrazhensky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 03.06.2024; одобрена после рецензирования 08.07.2024; принята к публикации 12.07.2024.

The article was submitted 03.06.2024; approved after reviewing 08.07.2024; accepted for publication 12.07.2024.