

18. *D'yakonov V.P.* MatLab. Polnyy samouchitel' [MatLab. Complete tutorial]. Moscow: DMK Press, 2012, 768 p.
19. *Porshnev S.V.* Komp'yuternoe modelirovanie fizicheskikh processov v pakete MatLab [Computer simulation of physical processes in MatLab package]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom, 2003, 592 p.
20. *Sizikov V.S.* Obratnye prikladnye zadachi i MatLab: ucheb. posobie [The reverse applied problems and MatLab: a tutorial]. Saint Petersburg: Izd-vo «Lan», 2011, 256 p.
21. *Artyom M. Grigoryan, Merughan M. Grigoryan.* Image Processing: Tensor Transform and Discrete Tomography with MATLAB. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013, 466 p.
22. *Zhuravel' I.M.* Kratkiy kurs teorii obrabotki izobrazheniy [A short course in image processing theory]. Available at: <http://matlab.exponenta.ru/imageprocess/book2/47.php>.
23. *Daniil Basmanov.* Brezenkhem i U na strazhe diagonaley [Bresenham, and the guardian of the diagonals]. Available at: <https://habrahabr.ru/post/185086/>.
24. Algoritm Brezenkhema [Algorithm Bresenham]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Algoritm\\_Brezenhehema](https://ru.wikipedia.org/wiki/Algoritm_Brezenhehema).
25. Algoritm Vu [Wu's Algorithm]. Available at: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Algoritm\\_Vu](https://ru.wikipedia.org/wiki/Algoritm_Vu).
26. *Andersen A.H., Kak A.C.* Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm, *Ultrasonic imaging*, 1984, Vol. 6, No. 1, pp. 81-94.
27. *Yu X. et al.* cuART: Fine-Grained Algebraic Reconstruction Technique for Computed Tomography Images on GPUs, *Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2016 16th IEEE/ACM International Symposium on.* IEEE, 2016, pp. 165-168.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Соколов.

**Воронков Олег Юрьевич** – Научно-технический центр «Техноцентр» Южного федерального университета; e-mail: [oleg.voronkov.1985@gmail.com](mailto:oleg.voronkov.1985@gmail.com); 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: +79508449549; к.т.н.; научный сотрудник.

**Ковтун Данил Георгиевич** – Южный федеральный университет; e-mail: [dan-kav@ya.ru](mailto:dan-kav@ya.ru); 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; тел.: 88634371632; кафедра теоретических основ радиотехники; аспирант.

**Синюгин Сергей Алексеевич** – e-mail: [ssin@mail.ru](mailto:ssin@mail.ru); тел.: 88634311143; кафедра встраиваемых систем; зав. кафедрой; к.т.н.

**Voronkov Oleg Yurievich** – Scientific and Technical Center “Technocenter” Southern Federal University; e-mail: [oleg.voronkov.1985@gmail.com](mailto:oleg.voronkov.1985@gmail.com); 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +79508449549; cand. of eng. sc.; researcher.

**Kovtun Danil Georgievich** – South Federal University; e-mail: [dan-kav@ya.ru](mailto:dan-kav@ya.ru); 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634371632; the department of fundamental of radioengineering; postgraduate student.

**Sinyutin Sergey Alexeevich** – e-mail: [ssin@mail.ru](mailto:ssin@mail.ru); phone: +78634311143; the department of embedded systems; head of department; cand. of eng. sc.

УДК 621.396

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-81-93

**И.Я. Львович, А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров**

### **МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ОБЪЕКТЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

*Рассматривается задача, связанная с моделированием рассеяния электромагнитных волн на металлическом объекте, который имеет сложную форму. Метод интегральных уравнений применяется для того, чтобы рассчитать характеристики рассеяния. Было выбрано уравнение Фредгольма второго рода, базирующееся на плотности неизвестного электрического тока. Когда проводилось решение интегрального уравнения при помощи метода моментов, то было дано правильное описание сингулярности ядра. Кусочно-постоянные функции рассматривались как базисные функции. В качестве пробных функ-*

ций были взяты функции Дирака. Проводилось решение выбранного интегрального уравнения при помощи метода моментов. Исходя из интеграла Кирхгофа, проводится определение рассеянного электромагнитного поля, оно имеет связь с найденными электрическими токами. Закономерности рассеяния электромагнитных волн изучались для области передней полусферы апертуры полой структуры, входящей в состав объекта. Для того, чтобы оптимизировать характеристики рассматриваемых дифракционных структур применялся генетический алгоритм. Приведена демонстрация вариантов решений такого алгоритма. Дана таблица вероятности отбора хромосом. Мы применяли популяцию, в которую входили четыре хромосомы. Процесс выбора хромосом осуществлялся на базе метода колеса рулетки. Даны результаты оптимизации размеров анализируемой дифракционной структуры. Приведены основные этапы методики расчета дифракционных структур, которая связана с комбинацией метода интегральных уравнений и генетического алгоритма.

*Дифракция; рассеяние радиоволн; оптимизация; интегральное уравнение; генетический алгоритм.*

**I.Ya. Lvovich, A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov**

### **THE METHOD FOR OPTIMIZATION OF CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC WAVES SCATTERING ON AN OBJECT OF COMPLEX SHAPE**

*In this paper we consider the problem associated with the simulation of electromagnetic wave scattering on a metal object that has a complex shape. The method of integral equations is used to calculate the scattering characteristics. Fredholm equation of the second kind was chosen, based on the density of an unknown electric current. When the integral equation was solved using the method of moments, the correct description of the kernel singularity was given. Piecewise constant functions were considered as basis functions. Dirac functions were taken as trial functions. The solution of the chosen integral equation was carried out using the method of moments. Based on the Kirchhoff integral, the determination of the scattered electromagnetic field is carried out, it has a connection with the found electric currents. The regularities of electromagnetic wave scattering were studied for the region of the anterior hemisphere of the aperture of the hollow structure that is part of the object. In order to optimize the characteristics of the considered diffraction structures, a genetic algorithm was used. The demonstration of solutions of such algorithm is given. The table of probability of chromosome selection is given. We applied the population, which consisted of four chromosomes. The process of selecting chromosomes was carried out on the basis of the roulette wheel method. The results of optimization of the size of the analyzed diffraction structure are given. The main stages of the method for calculation of diffraction structures, which is associated with a combination of the method of integral equations and genetic algorithm.*

*Diffraction; radio wave scattering; optimization; integral equation; genetic algorithm.*

**Введение.** Одной из задач, которая имеет важное значение при разработке объектов техники [1–3], является изучение процессов рассеяния радиоволн [5–6] на дифракционных структурах [7–9], которые характеризуются разными сложными формами в радиолокационном диапазоне длин волн в резонансной области [10, 11].

Проведение анализа и синтеза технических объектов должно проводиться таким образом, чтобы полным образом учитывать существующие в них физические процессы.

Это обусловлено тем, что требуется минимизировать появляющиеся погрешности, по ним трудно осуществлять контроль, давать оценку по ключевым характеристикам.

Решение задач усложняется и потому, что искомые величины могут очень быстро изменяться в зависимости от того, какая анализируется поляризация, частота, где находятся передающее и приемное устройство сигнала.

Разработка теоретических моделей является важной в связи с тем, что для того, чтобы получить информацию по электродинамическим параметрам (например, характеристикам рассеяния) необходимо наличие дорогостоящего экспериментального оборудования, которое будет аттестованным.

Во многих работах, когда осуществляется анализ, происходит формирование моделей и математического аппарата, которые дают возможности для проведения расчетов по характеристикам соответствующих элементарных отражателей, а затем полученные результаты можно применять для того, чтобы проводить оценки по характеристикам для структур, являющихся более сложными.

Металлические структуры могут являться частями технических объектов, различными конструктивными элементами, а также компонентами антенно-фидерных устройств.

Если говорить о прикладном характере исследований, то при разработке алгоритмов важно, чтобы была возможность оценки параметров трехмерных объектов, поскольку при этом не всегда есть возможности для того, чтобы размерность задач была уменьшена.

На настоящий момент нельзя говорить о том, что существуют универсальные алгоритмы и подходы, в рамках которых можно осуществлять анализ и синтез дифракционных структур, имеющих произвольные конфигурации.

Для того, чтобы рассматривать и проектировать разные рассеивающие структуры сейчас существуют соответствующие программные продукты. При этом из них многие нацелены на то, чтобы решать определенные специальные вопросы.

Исследуемые дифракционные структуры во многих случаях имеют размеры, которые относятся к резонансной области.

Анализируя подходы, которые могут быть использованы для того, чтобы оценить рассеивающие характеристики сложных металлических объектов, мы исходили из некоторых требований:

1. Подход должен быть эффективен для того, чтобы его применяли при расчетах параметров сложного объекта, имеющего произвольную форму.
2. Подход должен обеспечивать хорошую точность.
3. Подход должен быть относительно легко реализуем.

Основываясь на рассмотрении различных подходов, можно утверждать, что, что метод интегральных уравнений в достаточно большом числе случаев рассматривается как удовлетворяющий отмеченным критериям.

Конечно, если размеры анализируемого объекта довольно большие, тогда такой подход будет весьма громоздким, он может потребовать привлечения больших ресурсов, подобно другим численным способам.

Интегральное уравнение должно быть решено при учете того, какие особенности варьирования параметров каждого участка исследуемых дифракционных структур.

Размеры объектов могут быть такими, что при расчетах по одному компоненту может не хватать машинных ресурсов, но при этом в дальнейшем можно привлечь способы, в рамках которых возможны оценки характеристики по совокупности элементов, которые являются объединенными в группу.

Интегральные уравнения по одному объекту мы можем обобщить относительно системы объектов.

Тогда область интегрирования и область, по которой изменяется точка наблюдения, при этом будет рассматриваться не по одному, а по совокупности объектов.

**Постановка задачи.** Проведем рассмотрение решения задачи на базе метода интегральных уравнений. При учете граничных условий для контура интегральное уравнение Фредгольма второго рода по электрическому току [12] объекта (рис. 1) записывается таким образом

$$J_{\ell}(r) = 2n \times H_{\text{incident}}(r) + \frac{1}{2\pi} \int_{\ell} J_{\ell}(r) \times gG' ds', \quad (1)$$

здесь  $G = \exp(-jkr)/r$  – в трехмерном случае представляет собой функцию Грина, она является характеристикой свободного пространства, если приходится рассматривать  $\delta$ -образный источник, позволяет давать описание решения уравнения Гельмгольца;  $gG'$  – задает градиент  $G$  в том случае, когда анализируем штрихованные координаты;  $\ell$  – задает контур объекта, который мы анализируем;  $n$  – обозначает внешнюю нормаль по отношению к контуру анализируемой дифракционной структуры, она выходит из точки наблюдения;  $J_{\ell} = [n \times H_{\text{incident}}]$  – дает описание плотности эквивалентного электрического тока;  $H_{\text{incident}} = xH_{\text{incident},x} + yH_{\text{incident},y}$  – является вектором первичной плоской электромагнитной волны, которая вертикально поляризована.

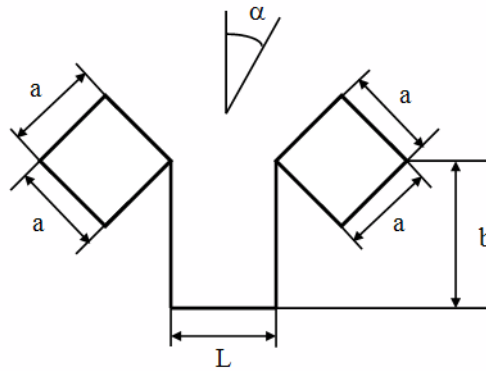


Рис. 1. Схема рассеяния электромагнитных волн на объекте, имеющем сложную форму

С тем, чтобы определять неизвестные поверхностные электрические токи  $J_{\ell}$  на контуре анализируемых структур осуществляется решение интегрального уравнения (1) при помощи метода моментов [13, 14] таким образом. Для разложения электрических токов на поверхности структур определяем систему базисных функций. Мы выбираем кусочно-постоянные функции в нашем случае в качестве базисных функций. Затем необходимо ввести систему пробных функций. Пробными функциями в нашем случае были взяты  $\delta$ -функции Дирака. Использование этой системы с точки зрения физики демонстрирует, что выполнение граничных условий по магнитному полю справедливо не для всех границ анализируемой структуры  $\ell$ , но лишь в конечном числе точек. Когда делается выбор достаточного количества точек, анализ демонстрирует [12], что, в них происходит удовлетворение граничных условий, мы можем достичь высокой точности решений, когда идет моделирование рассеяния электромагнитных волн на различных объектах [15, 16].

За счет выбора  $\delta$ -импульсов есть возможности перехода от первичного интегрального уравнения к матричному, при этом матричные элементы вычисляются относительно просто.

Указанная процедура основывается на методе кусочно-постоянного базиса при поточечном сшивании. Важно отметить, что изначально для решения интегрального уравнения нет необходимости представления его некоторым специальным образом. Поэтому мы и говорим об универсальности метода.

Понятно, что по каждой определенной конфигурации сложного объекта есть возможности для того, чтобы был подобран более эффективный способ, позволяющий проводить численное решение интегрального уравнения, он может быть и более экономичным. Но тестирование демонстрирует, что если не задаваться чрезмерной точностью, за счет аппроксимации, осуществляемой кусочно-постоянным образом можно более эффективным способом получать решение задач, если проводить сравнение со случаями, в которых используют линейную, 5-точечную, параболическую виды аппроксимация или если будут применяться сплайны.

Получаем обеспечение быстрой сходимости и хорошую точность по решению, как правило, для значения участков дискретизации в тех случаях, когда оно не более  $0.1\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны. Наблюдая за особенностями участков поверхности исследуемого объекта, дискретизацию можно изменять. Найти решение интегрального уравнения при соответствующей точности, когда форма контура такого объекта будет достаточно сложной, малый шаг интегрирования является необходимым условием, это требуется для участков, где идет быстрое изменение кривизны контура. Возможно, что не надо будет делать очень малый шаг по другим участкам интегрирования.

После того, как было осуществлено численное моделирование мы установили, что для достижения ошибки, не превышающей 3 %, когда вычисляется ток, требуется при вычислениях, чтобы величина интервала дискретизации лежала в пределах  $[\lambda/10, \lambda/5]$ .

Необходимо было стремиться к устойчивому численному решению, когда формировался алгоритм по вычислению тока в рамках метода Боголюбова-Крылова, если возрастает число базисных функций, то ряд, который аппроксимирует такой ток, имел сходимость к точному значению распределения тока, который будет на поверхности объекта. В качестве практического критерия того, что численное решение является достоверным, можно считать неизменность тока, когда увеличивается размерность массива значений тока в системе линейных уравнений.

Как результат применения метода моментов интегральное уравнение (1) переходит в систему уравнений:

$$\begin{bmatrix} \Omega_{x,x} & \Omega_{x,y} \\ \Omega_{y,x} & \Omega_{y,y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{\ell,x} \\ J_{\ell,y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Psi_x \\ \Psi_y \end{bmatrix}, \quad (2)$$

здесь  $J_{\ell,x}$ ,  $J_{\ell,y}$  – являются компонентами плотности поверхностных электрических токов.

Когда мы рассматриваем систему линейных уравнений, имеющую фиксированную размерность, то ее корни будут определяться, в основном, приближенным образом вследствие того, что неточно задаются матрица в этой системе (матрица обобщенных импедансов) и столбец свободных членов, а также вследствие того, что округляются числа при процессах численного решения на компьютере. В этой связи для того, чтобы было получено устойчивое решение (2), требуется, чтобы была обеспечена хорошая обусловленность в обрабатываемой матрице обобщенных импедансов.

Показателя обусловленности матрицы – это число обусловленности, которое рассчитывается так

$$\psi(m) = \| [\Theta_{nm}] \| \cdot \| [\Theta_{nm}]^{-1} \|, \quad (3)$$

где нормой матрицы  $[\Theta_{nm}]$  – это  $\|[\Theta_{nm}]\|$ ; матрица погрешностей обозначается как  $[\Theta_{nm}] = [\Omega_{nm}] + [\Delta\Omega_{nm}]$ , матрица, обратная к  $[\Theta_{nm}]$ , обозначается как  $[\Theta_{nm}]^{-1}$ , причем ее рассчитываем с погрешностью, она появляется, поскольку неточным образом задаются элементы  $\Omega_{nm}$ .

Количественным показателем погрешности  $[\Delta J_m]$ , когда проводим расчет  $[J_m]$ , будет число  $\varepsilon(n)$ . Погрешность будет существовать вследствие того, что идет округление чисел при осуществлении арифметических операций в ходе численного решения. При этом  $\varepsilon(n)$  определяется из неравенства [6, 17]:

$$\|[\Delta\Omega_{nm}]\| \leq \varepsilon(n) \cdot \|[\Omega_{nm}]\|, \quad (4)$$

здесь  $\|[\Delta\Omega_{nm}]\|$  представляет собой матрицу невязки, при помощи которой характеризуется ошибка в решении системы уравнений (2), поскольку округляются числа при численных расчетах.

Из (3) и (4) получаем, что когда вычисляется  $[J_m]$ , требуется осуществлять контроль величины  $\varepsilon(m) \cdot \psi(m)$ , чтобы если увеличивалось  $m$ , ее значение оставалось достаточно малым [6, 17]. При численном решении малое произведение  $\varepsilon(m) \cdot \psi(m)$  дает гарантию устойчивости процессов сходимости. Увеличивать точность по расчету матричных элементов  $[\Omega_{nm}]$  (при этом происходит уменьшение  $\varepsilon(n)$ ) важно, когда увеличивается  $\psi(m)$ . Анализ продемонстрировал, что для тех случаев, когда применяем кусочно-постоянную аппроксимацию, требуется, чтобы соблюдалась равномерная дискретизация поверхности объекта, чтобы число обусловленности не возрастало резким образом.

Для указанной выше системы (2) при вычислении блоков в матрице  $\Omega$  применены следующие выражения:

$$\begin{aligned} (\Omega_{x,x})_{m,n} &= \frac{1}{2\pi_\ell} \int (n_y)_m (gG'_y)_{mn} d\ell'_n - \delta_{mn}; \\ (\Omega_{x,y})_{m,n} &= -\frac{1}{2\pi_\ell} \int (n_y)_m (gG'_x)_{mn} d\ell'_n \\ (\Omega_{y,x})_{m,n} &= -\frac{1}{2\pi_\ell} \int (n_x)_m (gG'_y)_{mn} d\ell'_n; \\ (\Omega_{y,y})_{m,n} &= \frac{1}{2\pi_\ell} \int (n_x)_m (gG'_x)_{mn} d\ell'_n - \delta_{mn}; \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m, n = 1, \dots, N$ , где  $N$  – количество точек разбиения контура объекта.

Здесь  $\delta_{mn}$  – является символом Кронекера,

$$gG_{mn} = -r_{mn}^{\text{norm}} \frac{1+jkr}{r_{mn}} \exp(-ikr_{mn}) = i(gG'_x)_{mn} + j(gG'_y)_{mn}, \quad (6)$$

где  $r_{mn}^{\text{norm}} = \frac{r_{mn}}{|r_{mn}|}$  – рассчитывается как единичный вектор, направленный из точки источника в точку наблюдения [12].

Для вектора-столбца свободных членов мы записываем следующие выражения:

$$(\Psi_x)_m = 2(n_y)_m (H_{\text{incident},z})_m, \quad (\Psi_y)_m = 2(n_x)_m (H_{\text{incident},z})_m, \quad (7)$$

После того, как проведено решение приведенной системы уравнений (2) происходит вычисление рассеянного электромагнитного поля для дальней зоны, которое связано с определенным электрическим током  $J_\ell$  таким образом [12]:

$$H^{\text{scatter}}(\mathbf{r}) = \frac{j\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \exp(-jk r)}{4\pi r} \int_{\ell} J_\ell(\mathbf{r}') \times \mathbf{r}^{\text{norm}} \exp(jkr^{\text{norm}}) d\ell', \quad (8)$$

где  $k$  – является волновым числом электромагнитной волны;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – представляют собой магнитную и электрическую постоянную;  $\mathbf{r}'$  – дает радиус-вектор точки источника;  $\mathbf{r}$  – дает радиус-вектор точки наблюдения по дальней зоне.

Осуществляется расчет эффективной площади рассеяния (ЭПР) дифракционной структуры на базе такой формулы [12]

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|H^{\text{scatter}}(\mathbf{r})|^2}{|H_{\text{incident}}(\mathbf{r})|^2}. \quad (9)$$

Задача состоит в определении размеров дифракционной структуры [17–19], при которых для заданного угла наблюдения значение ЭПР не будет превосходить заданного значения.

Для этого мы будем использовать метод оптимизации, базирующийся на генетическом алгоритме (ГА) [20–22].

Идея ГА состоит в том, что применяется эвристический подход, связанный с поиском оптимального решения. При этом основываемся на случайной вариации, подборе осуществления комбинирования по необходимым параметрам с привлечением таких механизмов, которые будут аналогичны естественному отбору, наблюдаемому в природе.

Задачу оптимизации мы формализуем так, чтобы решение было закодировано как вектор генов. При этом каждый из генов будет битом.

У фитнес-функции достаточно гладкий рельеф. По тому множеству решений, которое было получено, при учете значений "приспособленности" нами был проведен выбор решений, для них были применены "генетические операторы", как результат получались новые решения.

В ГА можно указать такие основные шаги:

1. Происходит задание целевой функции по особям популяции. В нашем случае необходимо было обеспечить равенство ЭПР объекта определенному значению.

2. Идет формирование начальной популяции.

3. Начинается цикл, в нем выделяется:

А. Процедура скрещивания;

Б. Процедура мутирования;

В. Целевую функцию вычисляем по всем особям;

Г. Обеспечиваем создание процедуры селекции, когда новые поколения формируются;

Д. Когда условия, связанные с остановкой будут выполнены, тогда цикл окончен, в противном случае – будет переход к началу цикла.

На рис. 2 приведена схема работы ГА.

Хромосома в нашей задаче характеризуется 5 генами:  $\rho, \phi, \nu, \gamma, \chi$ . В связи с тем, что ген представляет собой целое число, которое меньше чем 30, то для того, чтобы провести кодирование по каждому гену мы можем использовать 5 битов. Для такого случая хромосома представляется в виде, приведенном на рис. 3.

Например, для того, чтобы был сделан поиск решения, мы применяем популяцию из 4 хромосом. Сначала сделаем генерацию 4 случайных возможных вариантов решений:

$$F(\rho, \varphi, \nu, \gamma, \chi), \text{ где } \rho, \varphi, \nu, \gamma, \chi \in \{1, 2, 3 \dots 30\}, \quad (10)$$

и покажем связь каждого варианта и ошибки в решении:

$$\delta = |F(\rho, \varphi, \nu, \gamma, \chi) - FD(\rho, \varphi, \nu, \gamma, \chi)|. \quad (11)$$

В табл. 1 дана демонстрация вариантов решений (используется десятичный код). Базовая идея работы ГА [23–25] заключается в том, чтобы происходило выживание хромосом, которые имеют меньшую ошибку в решении. Поэтому относительная пригодность хромосомы описывается на основе формулы  $ОтнПриг = 1/\delta$ .

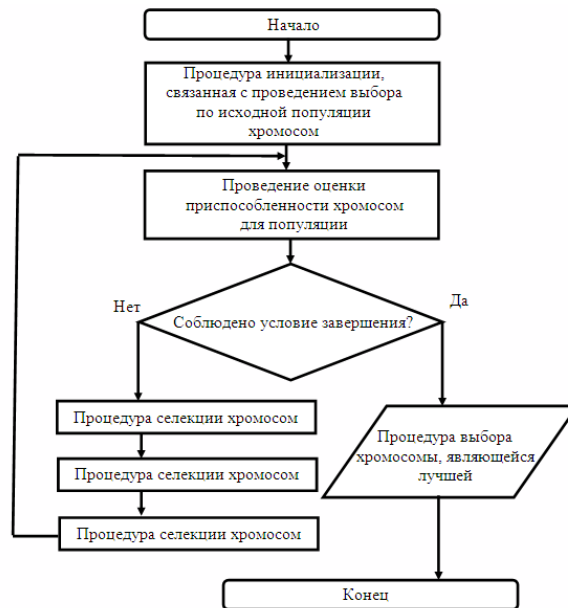


Рис. 2. Схема работы ГА

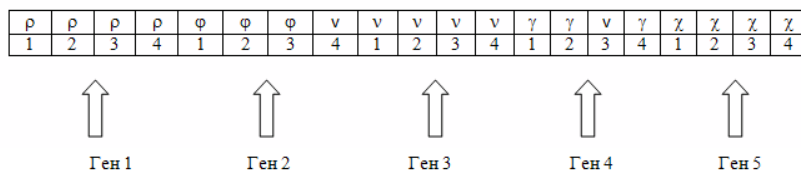


Рис. 3. Схема хромосомы

Таблица 1

Варианты решения			
Номер хромосомы	Вариант (x1, x2, x3, x4, )	Ошибка $\delta$	ОП
1	(2,21,15,5,4)	62.5	0.016
2	(13,8,4,6,8)	21.28	0.047
3	(12,3,9,7,10)	27.03	0.037
4	(20,1,16,18,11)	123.458	0.0081



Для того, чтобы вычислить вероятность отбора хромосомы для будущей популяции, мы можем воспользоваться формулой

$$P_s = \frac{O_{тн}Приг_s}{\sum_{s=1}^4 O_{тн}Приг_s}, \quad (12)$$

Результаты использования этой формулы показаны в табл. 2.

Таблица 2

**Вероятность отбора хромосом**

Номер i	$P_i$	$U_i, \%$
1	$0.016/0.1081=0.099$	14.8
2	$0.047/0.1081=0.2614$	43.5
3	$0.037/0.1081=0.2731$	34.2
4	$0.0081/0.1081=0.0528$	7.5

Для того, чтобы сделать дальнейший выбор хромосом мы воспользуемся методом колеса рулетки. При этом для каждой из хромосом мы ставим в соответствие сектор на колесе  $Z_i$  (рис. 4).

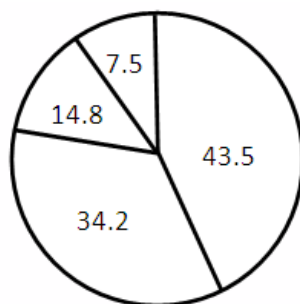


Рис. 4. Распределение секторов рулетки

После того, как осуществлено каждое вращение колеса, идет выбор какого-то сектора, то есть хромосомы. После того, как произошло 14 вращений колеса, отбираются 18 хромосом, из них на основе случайного закона происходит формирование 7 пар для того, чтобы осуществлялось скрещивание. Результаты расчетов даны в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты отбора на основе метода колеса рулетки**

Номер i отца	Номер i матери
2	1
3	2
3	1
3	2
2	1

Исходя из табл. 2 самая плохая хромосома 4 нами ни разу была отобрана для скрещивания. Хромосома 1 нами была выбрана меньшее число раз, а хромосомы 2, 3 мы отбирали часто, поскольку им соответствует высокая  $O_{тн}Приг$ .

Дальнейшей генетической операцией будет скрещивание. Средней ошибкой решения для популяции потомков является 53, однако для первоначальной популяции значение этого коэффициента равнялось 61.

Число итераций в рассматриваемом подходе не превосходило 25.

По исследуемой дифракционной структуре, приведенной на рис. 1 были получены такие результаты для угла наблюдения  $\alpha=30^\circ$  и уровня ЭПР 6 дБ: а)  $L=2\lambda$ ,  $a=4.5\lambda$ ,  $b=6.7\lambda$ ; б)  $L=3\lambda$ ,  $a=3.7\lambda$ ,  $b=5.1\lambda$ .

В итоге, ключевые этапы методики синтеза дифракционной структуры со сложной формой такие:

1. Задание первоначальных размеров дифракционной структуры.
2. Осуществление расчетов характеристик рассеяния, основываясь на методе интегральных уравнений.
3. Проведение оптимизации характеристик полой структуры на основе ГА.
4. Вывод результатов расчетов.

Указанный подход может быть применен для широкого класса электродинамических структур.

Вывод. В работе рассмотрены основные этапы методики оптимизации характеристик рассеяния электромагнитных волн на объекте сложной формы. Новым в предлагаемом подходе является то, что используется комбинация строгого метода интегральных уравнений и ГА. Преимущества предлагаемой методики заключаются в возможности синтеза объектов сложной формы с заданным уровнем характеристик рассеяния в определенном направлении наблюдения, при этом достаточно использовать небольшое число итераций, алгоритм быстро сходится.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кульнева Е.Ю., Гащенко И.А. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств // Современные наукоемкие технологии. – 2014. – № 5-2. – С. 50.
2. Костюченко В.В., Анкина Н.А. Моделирование рассеяния импульсов радиоволн на полой структуре // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2017. – № 2 (17).
3. Болучевская О.А., Горбенко О.Н. Свойства методов оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2013. – № 3. – С. 4.
4. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / под ред. Л.Т. Тучкова. – М.: Радио и связь, 1985. – 235 с.
5. Steynberg B.D., Carlson D.L., Wu Stan Lee. Experimental determination of EPO individual reflective parts of the aircraft // Proc. – 1989. – № 5. – P. 35-42.
6. Mitra R., Tatsuo Itoh, Ti-Shu Li. Analytical and numerical studies of the relative convergence phenomenon arising in the solution of an integral equation by the moment method // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1972. – Vol. MTT-20, No. 2. – P. 96-104.
7. Sekine T., Kobayashi K., and Yokokawa S. Transient Analysis of Lossy Nonuniform Transmission Line Using the Finite Difference Time Domain Method // Electronics and Communications in Japan. – Aug. 2002. – Part 3. – Vol. 85, No. 8. – P. 1018-1026.
8. Lu T.L., Guo L., Cui X., and Hagness X. Gu. Research of Experiments and the FDTD Method of Multi-conductor Transmission Lines for Transient Analysis // IEEE EMC Symp. – 2004. – No. 138. – P. 708-712.
9. Johansson F.S. A new planar grating-reflector antenna // IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1990. – Vol. 38, No. 9. – P. 1491-1495.
10. Hirono T., Lui W., Seki S., and Yoshikuni Y. A Three-Dimensional FourthOrder Finite-Difference Time-Domain Scheme Using a Symplectic Integrator Propagator // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – Sep. 2001. – Vol. 49, No. 4. – P. 1640-1648.
11. Michalski K.A. and Zheng D. Electromagnetic scattering and radiation by surfaces of arbitrary shape in layered media, Part II: Implementation and results for contiguous half-spaces // IEEE Trans. Antennas Propag. – Mar. 1990. – Vol. 38, No. 3. – P. 345-352.

12. Вычислительные методы в электродинамике / под ред. Р. Митры. – М.: Мир, 1977. – 485 с.
13. Панарин Д.Г. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на электродинамических объектах с использованием модифицированного метода моментов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 3 (14). – С. 8.
14. Глотова Т.В., Мельникова Т.В. Модификация метода моментов в задачах рассеяния электромагнитных волн // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2016. – № 2 (13). – С. 11.
15. Скляр А.Г., Данилова А.В. Анализ возможностей использования лучевых методов для оценки характеристик рассеяния металлических тел // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2015. – № 3 (10). – С. 5.
16. Алимбеков А.Р., Авдеев Е.А., Шевелев В.В. Методы определения рассеивающих свойств объектов // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2013. – № 1 (20). – С. 22-24.
17. Штагер Е.А., Чаевский Е.Н. Рассеяние волн на телах сложной формы. – М.: Сов. радио, 1974. – 240 с.
18. Хенл Х., Мауэ А., Вестнфаль К. Теория дифракции. – М.: Мир, 1964. – 428 с.
19. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral / modal approach // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1990. – Vol. AP-38, No. 9. – P. 1413-1420.
20. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2013. – № 10. – С. 20-26.
21. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 384 с.
22. Bandyopadhyay S., and Muthy C.A. Pattern Classification Using Genetic Algorithms // Pattern Recognition Letters. – Vol. 16. – 1995. – P. 801-808.
23. Marwan A.Ali, Mat Sakim H.A. Rosmiwati Mohd-Mokhtar Structure Optimization of Neural Controller Using Genetic Algorithm Technique // European Journal of Scientific Research. – 2009. – Vol. 38, No. 2. – P. 248-271.
24. Satyanarayana D., Kamarajan K., and Rajappan M. Genetic Algorithm Optimized Neural Networks Ensemble for Estimation of Mefenamic Acid and Paracetamol in Tablets, Genetic Algorithm Optimized Neural Networks Ensemble // Acta Chim. Slov. Volume 52. – 2005. – P. 440-449.
25. Kuncheva L.I., and Jain L.C. Designing Classifier Fusion Systems by Genetic Algorithms // IEEE Transaction on Evolutionary Computation. – 2000. – Vol. 33. – P. 351-373.

#### REFERENCES

1. Kul'neva E.Yu., Gashchenko I.A. O kharakteristikakh, vliyayushchikh na modelirovanie radiotekhnicheskikh ustroystv [On the characteristics influencing the modeling of radio engineering devices], *Sovremennye naukoemkie tekhnologii* [Modern science-intensive technologies], 2014, No. 5-2, pp. 50.
2. Kostyuchenko V.V., Ankina N.A. Modelirovanie rasseyaniya impul'sov radiovoln na poloy strukture [Modeling of the scattering of pulses of radio waves to the hollow structure of the], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Simulation, optimization and information technology], 2017, No. 2 (17).
3. Boluchevskaya O.A., Gorbenko O.N. Svoystva metodov otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln [Properties of methods of estimation of characteristics of electromagnetic waves scattering], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies], 2013, No. 3, pp. 4.
4. Radiolokatsionnye kharakteristiki letatel'nykh apparatov [Radar characteristics of aircraft], ed. by L.T. Tuchkova. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 235 p.
5. Steynberg B.D., Carlson D.L., Wu Stan Lee. Experimental determination of EPO individual reflective parts of the aircraft, *Proc.*, 1989, No. 5, pp. 35-42.
6. Mitra R., Tatsuo Itoh, Ti-Shu Li. Analytical and numerical studies of the relative convergence phenomenon arising in the solution of an integral equation by the moment method, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 1972, Vol. MTT-20, No. 2, pp. 96-104.

7. Sekine T., Kobayashi K., and Yokokawa S. Transient Analysis of Lossy Nonuniform Transmission Line Using the Finite Difference Time Domain Method, *Electronics and Communications in Japan*, Aug. 2002, Part 3, Vol. 85, No. 8, pp. 1018-1026.
8. Lu T.L., Guo L., Cui X., and Hagness X. Gu. Research of Experiments and the FDTD Method of Multi-conductor Transmission Lines for Transient Analysis, *IEEE EMC Symp.*, 2004, No. 138, pp. 708-712.
9. Johansson F.S. A new planar grating-reflector antenna, *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, 1990, Vol. 38, No. 9, pp. 1491-1495.
10. Hirono T., Lui W., Seki S., and Yoshikuni Y. A Three-Dimensional Fourth Order Finite-Difference Time-Domain Scheme Using a Symplectic Integrator Propagator, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Sep. 2001, Vol. 49, No. 4, pp. 1640-1648.
11. Michalski K.A. and Zheng D. Electromagnetic scattering and radiation by surfaces of arbitrary shape in layered media, Part II: Implementation and results for contiguous half-spaces, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Mar. 1990, Vol. 38, No. 3, pp. 345-352.
12. Vychislitel'nye metody v elektrodinamike [Computational methods in electrodynamics], ed. by R. Mitry. Moscow: Mir, 1977, 485 p.
13. Panarin D.G. Modelirovanie rasseyaniya elektromagnitnykh voln na elektrodinamicheskikh ob'ektakh s ispol'zovaniem modifitsirovannogo metoda momentov [Simulation of electromagnetic wave scattering on electrodynamic objects using the modified method of moments], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technologies], 2016, No. 3 (14), pp. 8.
14. Glotova T.V., Mel'nikova T.V. Modifikatsiya metoda momentov v zadachakh rasseyaniya elektromagnitnykh voln [Modification of the method of moments in problems of electromagnetic wave scattering], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2016, No. 2 (13), pp. 11.
15. Sklyar A.G., Danilova A.V. Analiz vozmozhnostey ispol'zovaniya luchevykh metodov dlya otsenki kharakteristik rasseyaniya metallicheskih tel [Analysis of the possibilities of using ray methods for the evaluation of the scattering characteristics of metal bodies], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2015, No. 3 (10), pp. 5.
16. Alimbekov A.R., Avdeenko E.A., Shevelev V.V. Metody opredeleniya rasseivayushchikh svoystv ob'ektov [Methods for determining the scattering properties of objects], *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh Institute of high technologies], 2013, No. 1 (20), pp. 22-24.
17. Shtager E.A., Chaevskiy E.N. Rasseyanie voln na telakh slozhnoy formy [Scattering of waves on bodies of complex shape]. Moscow: Sov. radio, 1974, 240 p.
18. Khenl Kh., Maue A., Vestpfal' K. Teoriya difraktsii [Diffraction theory]. Moscow: Mir, 1964, 428 p.
19. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral / modal approach, *IEEE Trans. Antennas Propagat*, 1990, Vol. AP-38, No. 9, pp. 1413-1420.
20. Erasov S.V. Optimizatsionnye protsessy v elektrodinamicheskikh zadachakh [Optimization processes in electrodynamic problems], *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy* [Bulletin of the Voronezh Institute of high technologies], 2013, No. 10, pp. 20-26.
21. Rutkovskaya D., Pilin'skiy M., Rutkovskiy L. Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]: translation from Polish I.D. Rudinskogo. Мщысщц: Goryachaya liniya – Telekom, 2013 384 p.
22. Bandyopadhyay S., and Muthy C.A. Pattern Classification Using Genetic Algorithms, *Pattern Recognition Letters*, 1995, Vol. 16, pp. 801-808.
23. Marwan A.Ali, Mat Sakim H.A. Rosmiwati Mohd-Mokhtar Structure Optimization of Neural Controller Using Genetic Algorithm Technique, *European Journal of Scientific Research*, 2009, Vol. 38, No. 2, pp. 248-271.
24. Satyanarayana D., Kamarajan K., and Rajappan M. Genetic Algorithm Optimized Neural Networks Ensemble for Estimation of Mefenamic Acid and Paracetamol in Tablets, Genetic Algorithm Optimized Neural Networks Ensemble, *Acta Chim. Slov.*, 2005, Vol. 52, pp. 440-449.
25. Kuncheva L.I., and Jain L.C. Designing Classifier Fusion Systems by Genetic Algorithms, *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 2000, Vol. 33, pp. 351-373.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.Н. Кострова.

**Львович Игорь Яковлевич** – Воронежский институт высоких технологий; e-mail: office@vivt.ru; 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73а; тел.: +74732020420; ректор; д.т.н.; профессор.

**Преображенский Андрей Петрович** – e-mail: komkovvivt@yandex.ru; д.т.н.; профессор.

**Чопоров Олег Николаевич** – e-mail: choporov\_oleg@mail.ru; 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14; тел.: +74732523420; д.т.н.; профессор.

**Lvovich Igor Yakovlevich** – Voronezh Institute of high technologies; e-mail: office@vivt.ru; 394043, Voronezh, Lenina str., 73a; phone: +74732020420; rector; dr. of eng. sc.; professor.

**Preobrazhenskiy Andrey Petrovich** – e-mail: komkovvivt@yandex.ru; dr. of eng. sc.; professor.

**Choporov Oleg Nikolaevich** – e-mail: choporov\_oleg@mail.ru; 394026, Voronezh, Moskovsky prospect, 14; phone: +74732523420; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 542.6.063

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-93-10

**Е.С. Алексюнин**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ РАСПЫЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ**

*Статья содержит материалы исследований ультразвуковых способов распыления жидких сред в слое и в фонтане. В обоих этих случаях образование капель аэрозоля происходит в результате их отрыва от гребней стоячих капиллярных волн на поверхности жидкости. С точки зрения ультразвуковых устройств указанные способы имеют ряд существенных различий. При распылении в слое стоячие капиллярные волны образуются на поверхности слоя жидкости, покрывающей пластину, колеблющуюся перпендикулярно своей поверхности. А фонтанирование и распыление происходит напротив центра вогнутой пластины за счёт эффекта самофокусировки в кавитирующей жидкости. Для обоих способов представлены конструкции устройств генерирующих аэрозоль. Для каждого из описанных устройств проведён анализ самых удачных вариантов моделирования и их реализации в «железе». А именно рассмотрен излучатель на основе комбинация стержневого преобразователя–концентратора с резонирующей на третьей моде осесимметричных колебаний дисковой пластиной и описаны результаты его исследования. На основе полученных данных предложена конструкция изгибного осесимметричного преобразователя–концентратора с значительно большей активной зоной. Предложен и опробован способ оптимизации осесимметричного преобразователя–концентратора. Приведено описание выявленных недостатков полученной конструкции и описан способ применённый для их устранения. В частности рассмотрен принцип создания эквивалентных схем для проектирования подобных устройств. Описаны результаты сравнения идеальной модели ультразвукового излучателя, построенной в системе конечно элементного моделирования, и конечного изделия построенного на её основе. В статье предложена схема компоновки распылительного узла на основе осесимметричного преобразователя–концентратора и колебательного контура, составленного из ёмкости преобразователя, внешней катушки индуктивности включённой последовательно с источником переменного напряжения и преобразователем, в качестве источника тока. Описанные в статье результаты будут полезны при проектировании различных медицинских систем и широкого спектра технических конструкций.*

*Распыление; ультразвук; жидкая среда; слой жидкости; аэрозоль.*