

УДК 537.87

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.020](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.020)

Модельное изучение процесса рассеяния электромагнитных волн на электродинамических структурах с нанесением диэлектрических материалов

Т.В. Аветисян^{1✉}, Я.Е. Львович², А.П. Преображенский², Ю.П. Преображенский²

¹Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж,
Российская Федерация

²Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. Рассеиватели радиолокационных сигналов (радиолокационные цели космического, воздушного, наземного и водного базирования) и преобразователи энергии электромагнитных волн (транспаранты, средства уменьшения заметности в радиодиапазоне волн, антенные устройства в сверхвысокочастотном диапазоне волн) имеют сложную геометрию и большие электрические размеры, а также содержат поглощающие и нелинейные элементы. Анализ и синтез указанной электродинамической техники на базе грубых знаний о физических процессах, происходящих в этих объектах, может привести к существенным и трудно контролируемым погрешностям в оценке их основных характеристик, которые быстро изменяются при изменении частоты, вида поляризации и угла падения электромагнитных волн. В данной работе исследуется методический подход, направленный на оценку и оптимизацию характеристик рассеяния электромагнитных волн, которые возникают при взаимодействии электромагнитных полей с электродинамическими структурами, содержащими диэлектрические включения. Для расчета этих характеристик используется метод интегральных уравнений, а для их оптимизации применяется генетический алгоритм. Результаты исследования демонстрируют работоспособность предлагаемых подходов. Рассмотренный в работе методический подход может быть использован для улучшения электромагнитной совместимости устройств, уменьшения их радиолокационной заметности.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, рассеяние электромагнитных волн, интегральное уравнение, генетический алгоритм, радиосвязь.

Для цитирования: Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П. Модельное изучение процесса рассеяния электромагнитных волн на электродинамических структурах с нанесением диэлектрических материалов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1408> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.020

Model study of electromagnetic wave scattering on electrodynamic structures with the application of dielectric materials

T.V. Avetisyan^{1✉}, Ya.E. Lvovich², A.P. Preobrazhenskiy², Yu.P. Preobrazhenskiy²

¹College of Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

²Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. Radar signal scatterers (space, air, ground and water-based radar targets) and electromagnetic wave energy converters (spatial light modulators, means of reducing visibility in the radio wave range, antenna devices in the ultra-high frequency wave range) have complex geometry and large electrical dimensions and also contain absorbing and nonlinear elements. The analysis and synthesis of this electrodynamic technique based on rough knowledge of the physical processes occurring in these objects

can cause significant and difficult-to-control errors in the assessment of their main characteristics, which change rapidly with changes in frequency, type of polarization and angle of incidence of electromagnetic waves. This paper examines a methodological approach aimed at evaluating and optimizing the scattering characteristics of electromagnetic waves that occur when electromagnetic fields interact with electrodynamic structures containing dielectric inclusions. To calculate these characteristics, the method of integral equations is used, and a genetic algorithm is employed to optimize them. The results of the study demonstrate the efficiency of the proposed approaches. The methodological approach considered in the paper can be used to improve the electromagnetic compatibility of devices, reduce their radar visibility.

Keywords: modeling, optimization, electromagnetic wave scattering, integral equation, genetic algorithm, radio communication.

For citation: Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P. Model study of electromagnetic wave scattering on electrodynamic structures with the application of dielectric materials. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1408> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.020 (In Russ.).

Введение

Во многих задачах, которые рассматриваются при анализе электродинамических объектов, исследователи стремятся к тому, чтобы обеспечить требуемые значения рассеянных полей в тех направлениях наблюдения, которые заранее были заданы. В данной работе рассматривается задача оптимизации параметров электродинамического объекта, что позволяет снизить уровень вторичного электромагнитного поля.

Методика расчета поля рассеяния электродинамических структур с нанесением диэлектрических материалов

Для того чтобы определить рассеянные электромагнитные поля для частных случаев простейших объектов можно опираться на аналитические выражения, которые приводятся в литературе [1, 2]. Если электродинамический объект имеет сложную форму, требуется применение численных подходов, например, в данной работе предлагается использование метода интегральных уравнений. Возможности расчета рассеянных полей в произвольном случае будут зависеть от характеристик используемых ЭВМ (память, быстродействие).

На Рисунке 1 представлен общий вид анализируемой электродинамической структуры. Каждый из размеров лежит в резонансной области. Всего в рассматриваемой структуре мы можем выделить F элементов. Структура состоит из металла (сталь), на него нанесены диэлектрические включения (показаны как заштрихованные области).

На поверхности рассматриваемой электродинамической структуры будет протекать электрический ток, который с учетом граничных условий входит в следующее интегральное уравнение [3, 4]:

$$J_z(u_2) + 2 \int_{\ell} J_z(u_2') [i\omega\epsilon G \cos(\theta - \theta_s) Z(u_2') + \frac{Z(u_2')}{i\omega\mu} + \frac{\partial G}{\partial u_{1p}}] d\ell = -2 \int_{\ell_s} (j^{es} \frac{\partial G}{\partial u_{1p}} + j^{ms} (j\omega\epsilon G \cos(\theta - \theta_s) + \frac{1}{j\omega\mu} \frac{\partial^2 G}{\partial u_2 \partial u_{2p}})) d\ell \quad (1)$$

В этом уравнении H_0^2 – функция Ханкеля второго рода с нулевым порядком, $G = (1/4j)H_0^2(kR)$ – функция Грина, которая соответствует двумерному случаю; ℓ и ℓ_s – контуры, по которым ведется процесс интегрирования при неизвестных и сторонних токах; $R = \sqrt{(x_s - x')^2 + (y_s - y')^2}$ – расстояние, которое будет между точкой, в которой находится наблюдатель и точкой интегрирования; j^{es} и j^{ms} – плотности, относящиеся к

сторонним электрическим и магнитным токам; θ, θ_s – угол, который относится к приемному устройству, и угол, связанный с процессами интегрирования; u_2 и u_2' – координаты точки, в которой находится ток, а также точки, связанной с процессом интегрирования; $Z(u_2')$ – значение импеданса в соответствующем участке контура ℓ , $\partial G/\partial u_{1p}, \partial G/\partial u_{2p}$ – для контура значения нормальной производной и касательной производной функции Грина; $\partial G/\partial u_2$ – для точки, где находится ток, значение нормальной производной функции Грина.

Можно уравнение (1) представить соответствующим образом, если на электродинамическую структуру будет падать E-поляризованная волна:

$$J_z(u_2) + 2 \int_{\ell} [J_z(u_2) [j\omega \epsilon G \cos(\theta - \theta_p) Z(u_2) + \frac{Z(u_2)}{j\omega \mu} + \frac{\partial G}{\partial u_{1p}}] + \frac{1}{j\omega \mu} \frac{\partial^2 G}{\partial u_2 \partial u_{2p}}] dl = -2\vec{n} \times \vec{H}^i. \quad (2)$$

Здесь \vec{H}^i является вектором радиоволны.

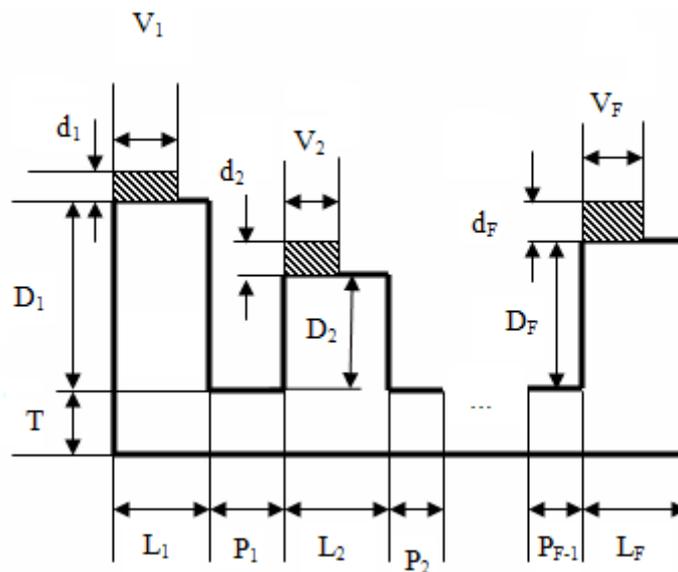


Рисунок 1 – Иллюстрация электродинамической структуры, представленной в общем виде
Figure 1 – General view of the electrodynamic structure

Метод моментов на контуре электродинамической структуры применяется для того, чтобы определить электрические токи $J_z(r)$. Основная идея такого подхода связана с дискретизацией контура электродинамической структуры. На базе метода моментов реализуется процесс прямого численного решения интегрального уравнения.

Рассматриваемая структура имеет как плоские поверхности, так и ребра. Контур автоматическим образом учитывается в интегральном уравнении.

Базисные и пробные функции могут выбираться с учетом различных параметров. В качестве основных критериев в ходе подобного выбора можно указать относительно простое вычисление соответствующих интегралов, а также близость функций к токам на наблюдаемых участках контуров. Анализ показал, что при расчетах для соблюдения необходимой точности достаточным будет выбор кусочно-постоянных функций в виде базисных и δ -функций Дирака в виде пробных.

В ходе численного решения мы осуществляем переход от интегрального уравнения (2) к системе линейных алгебраических уравнений

$$[A_{pq}][J_q] = [U_p]. \quad (3)$$

При этом матричные элементы по обобщенным импедансам будут вычисляться таким

$$\text{образом } A_{pq} = \int_{l_q - \frac{\Delta l}{2}}^{l_q + \frac{\Delta l}{2}} \left\{ \begin{array}{l} \frac{jk}{2R} H_1^{(2)}(kR) [(x_p - x_q)^2 \cos(\theta_q) - \\ -(y_p - y_q)^2 \cos(\theta_{qm})] + \frac{\omega \varepsilon}{2} H_0^{(2)}(kR) Z(l) \end{array} \right\} dl.$$

Множители разложения $J(z)$ соответствуют вектору-столбцу $[J_q]$.

Вектор-столбец эквивалентных потенциалов соответствует

$$U_p = -(\cos(\theta_p) \cos(\theta) + \sin(\theta_p) \sin(\theta)) \exp(jk(x_p \cos(\theta_p) + y_p \sin(\theta_p))).$$

Матричные элементы вычисляются достаточно просто при сделанном выборе пробных и базисных функций. Указанный подход называется методом Боголюбова-Крылова. Имеет значение отметить, что для решения интегрального уравнения не существует специального представления, которое было бы изначально задано. В этой связи метод может рассматриваться как достаточно универсальный, позволяющий осуществлять решения для электродинамических структур с различными контурами.

Если число элементов m электродинамической структуры будет большим, то это будет приводить к большим размерам соответствующих систем линейных уравнений. Величину участка дискретизации $\Delta \ell$ мы выбираем из такого условия с тем, чтобы обеспечить в решении высокую точность, а также быструю сходимость [5]:

$$\Delta \ell \leq \lambda/5. \quad (4)$$

От участка поверхности разбиения структуры существует зависимость величины $\Delta \ell$. Существуют, как это видно из Рисунка 1, изломы контура. Если происходит быстрое изменение кривизны контура, требуется использовать малый шаг интегрирования, чтобы обеспечить точность вычислений.

В результате численного моделирования была выявлена необходимость на изломах контура выбирать $\Delta \ell \leq \lambda/10$. При том, чтобы не было превышения 5 % для ошибки по вычислению тока. Важно, чтобы соблюдалась устойчивость в численном решении при формировании алгоритма, требующегося для того, чтобы вычислять $[J_q]$ на основе метода Боголюбова-Крылова.

На поверхности сложной электродинамической структуры к точным значениям распределений токов наблюдается сходимость ряда, аппроксимирующего $J(z)$. С точки зрения практики при численном решении (2) неизменность значений тока $J(z)$, когда растет размерность $[J_m]$, рассматривается как критерий достоверности.

Числа в ходе решения будут округляться в силу конечной разрядности ЭВМ. Кроме того, неточным образом будут задаваться матрицы $[A_{pm}]$ и $[U_p]$.

В этой связи обрабатываемая матрица обобщенных импедансов [6] должна обладать хорошей обусловленностью с тем, чтобы было получено устойчивое решение.

Число обусловленности рассматривается в виде количественного показателя для матрицы в соответствующей системе уравнений

$$\nu(m) = \|[B_{pm}]\| \|[B_{pm}]^{-1}\|. \quad (5)$$

В указанном выражении $\|[B_{pq}]\|$ является нормой матрицы $[B_{pq}]$. При этом $[B_{pq}] = [A_{pq}] + [\Delta A_{pq}]$, где $[\Delta A_{pq}]$ является матрицей погрешностей. Они появляются, поскольку неточным образом задается A_{pq} ; $[B_{pq}]^{-1}$ – матрица, которая будет обратной к $[B_{pq}]$.

Когда вычисляется $[J_m]$, то показатель погрешности $[\Delta J_m]$, который определяется количественным способом – это число $\varepsilon(q)$. Его можно найти на основе неравенства [7]: В указанном выражении $\|[B_{pq}]\|$ – представляет собой норму матрицы $[B_{pq}]$. $[B_{pq}] = [A_{pq}] + [\Delta A_{pq}]$, где $[\Delta A_{pq}]$ является матрицей погрешностей. При этом матрица погрешностей

возникает из-за неточного задания матрицы A_{pq} ; $[B_{pq}]^{-1}$ – это матрица, обратная матрице $[B_{pq}]$.

При вычислении $[J_m]$ показатель погрешности $[\Delta J_m]$, который определяется количественным способом – это число $\varepsilon(q)$. Его можно найти на основе неравенства [8]:

$$\|[\Delta B_{pq}]\| \leq \varepsilon(q) \cdot \| [B_{pq}] \| \quad (6)$$

При этом учитывается, что ошибка, связанная с решением системы уравнений, определяется на основе матрицы невязки $[\Delta B_{pq}]$. Она возникает вследствие того, что на ЭВМ в ходе расчетов будет происходить округление чисел.

Анализ (5) и (6) показывает, что, когда рассматривается $[J_m]$, важно отслеживать значение величины $\varepsilon(q) \cdot \nu(q)$. Необходимо, чтобы при увеличении m оно оставалось достаточно малым, чтобы при произведении $\varepsilon(q) \cdot \nu(q)$ можно было утверждать о стабильности численного решения во время сходимости. При увеличении значения $\nu(q)$ необходимо повышать точность вычисления матричных элементов $[A_{pq}]$, снижая значение $\varepsilon(q)$, чтобы избежать резкого увеличения числа обусловленности. Из анализа следует, что для поддержания равномерной дискретизации в рамках контура рассеивателя при разрывной аппроксимации необходимо использовать равномерную дискретизацию.

В интегральных уравнениях при использовании метода моментов могут возникать точки сингулярности в ядре, когда координаты точек наблюдения и интегрирования совпадают. Если $R \rightarrow 0$, то двумерная функция Грина $H_0^{(2)}(kR) \rightarrow \Delta \ell [1 - (\frac{j}{2\pi})[\gamma - 1 + \ln(\frac{k\Delta \ell}{4})]]$, при этом учитываем, что $\gamma = 0,577215664$ – это постоянная Эйлера.

Вычисление распределения рассеянных полей возможно после нахождения значения $[J_m]$ с помощью интеграла Кирхгофа, который определяется следующим выражением:

$$H(\theta_r) = \exp(-jkr) \sqrt{\frac{k}{2\pi r}} \int_{\ell} J_z(r') \exp(jkr' \cos(\theta_r)) dr' \quad (7)$$

В нем θ_r является углом наблюдения; k – волновое число; r – радиус-вектор точки наблюдения в дальней зоне.

Подсчет показателя эффективной рассеивающей площади (ЭПР) осуществляется таким образом [9]: $\sigma_{\text{эвм}} = 2\pi r |H(\theta_r)|$.

Описание функционирования генетического алгоритма

При рассмотрении задачи оптимизации мы предлагаем опираться на генетический алгоритм (ГА) [10]. Он будет применяться в ходе решения задачи, когда при заданном угле наблюдения по рассматриваемой электродинамической структуре необходимо обеспечение соответствующих уровней характеристик рассеяния [10]. На Рисунке 2 приведена иллюстрация схемы ГА.

Ген – элементарная единица наследственности, наименьший неделимый элемент наследственного материала, который может быть передан от родителей потомству как целое и который определяет признаки, свойства рассматриваемого объекта.

Нами рассматривается 4 гена: g_1 , g_2 , g_3 и g_4 , они для нашей задачи будут образовывать хромосому. Ген соответствует варианту рассматриваемой электродинамической структуры с заданным углом наблюдения и частотой электромагнитной волны. Первый ген соответствовал размеру структуры L_1 , второй ген соответствовал P_1 , третий ген – L_2 , четвертый ген – P_2 . Есть возможности для применения

5 битов в ходе осуществления кодирования по каждому гену. Тогда применяем двоичную систему счисления в ходе реализации процессов кодирования. Это вытекает из того, что число 30 будет больше, чем то число, которое соответствует гену. Мы основываемся на возможностях осуществления случайного перебора в рамках конечного набора решений. Исходим из заранее определенной точности, а также интервала, внутри которого происходит процесс изменения для каждой из переменных. На Рисунке 3 мы видим иллюстрацию анализируемой хромосомы.

Предлагается применять популяцию, которая будет состоять из 5 хромосом. Они будут принимать участие в том, что формируются потомки, которые функционируют в рамках репродуктивного плана. Они необходимы для того, чтобы в рамках решения осуществлять процесс поиска. Варианты решений рассматриваются как случайные. В ходе осуществления процедур моделирования проведем процесс генерации 5 по возможным вариантам решений:

$$F(g_1, g_2, g_3, g_4), g_1, g_2, g_3, g_4 \in \{1, 2, 3, \dots, 30\}. \quad (8)$$

Ошибка в решении, которая будет соответствовать каждому из вариантов, представляется таким образом:

$$\delta = |F(g_1, g_2, g_3, g_4) - FD(g_1, g_2, g_3, g_4)|. \quad (9)$$

Результаты моделирования

Дана иллюстрация вариантов решений в Таблице 1. В ходе рассмотрения мы используем десятичный код.

Таблица 1 – Иллюстрация вариантов решения
Table 1 –Solution options

Номер Хромосомы	Вариант (g_1, g_2, g_3 и g_4)	δ , Значение ошибки	ОП, значение относительной пригодности
1	(1,28,13,4)	79	0.013
2	(14,8,1,3)	25	0.039
3	(22,4,6,1)	21	0.037
4	(12,8,15,18)	101	0.0071
5	(8,11,3,2)	28	0.034

Если решение, полученное с помощью определенной хромосомы, содержит меньше ошибок, то такая хромосома имеет больше возможностей для выживания при использовании генетического алгоритма. Именно эта идея является основной, когда применяется генетический алгоритм. Поэтому для определения относительной пригодности хромосомы применяется формула $ОП = 1/\delta$, которая учитывает ее выживаемость.



Рисунок 2 – Иллюстрация схемы генетического алгоритма
Figure 2 – Genetic algorithm scheme

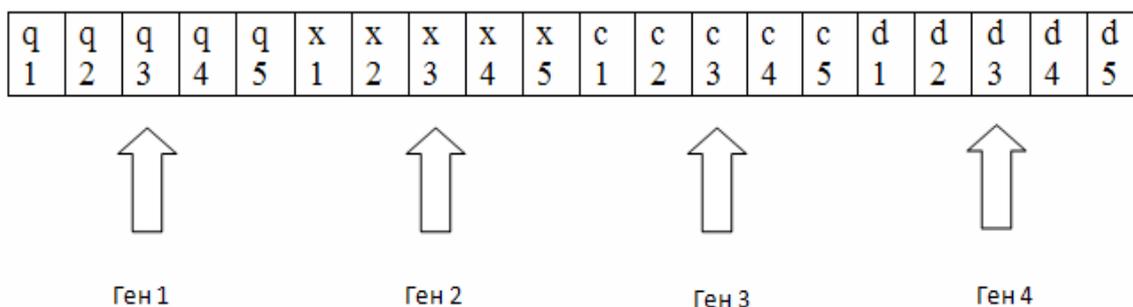


Рисунок 3 – Изображение структуры хромосомы
Figure 3 – Image of the chromosome structure

Формула, которую необходимо использовать для проведения анализа будущей популяции и расчета вероятности отбора хромосомы:

$$ОП = ОП_i / \sum_{i=1}^5 ОП_i. \quad (10)$$

В Таблице 2 приведена иллюстрация результатов использования этой формулы.

Таблица 2 – Пример, демонстрирующий вероятность отбора определенной хромосомы
Table 2 – Example demonstrating the probability of selecting a certain chromosome

Номер i	P_i	$U_i, \%$
1	$0.013/0.13 = 0.1$	10
2	$0.039/0.13 = 0.3$	30
3	$0.037/0.13 = 0.285$	28.5
4	$0.0071/0.135 = 0.055$	5.5
5	$0.034/0.13 = 0.26$	26

Последующие процедуры выбора по хромосомам мы будем реализовывать, когда реализуется моделирование. Тогда предлагаем использовать метод колеса рулетки. При этом рулетку мы можем разметить соответствующим образом. Сектор на колесе U_i мы будем сопоставлять с каждой из хромосом (*Рисунок 4*). В результате, мы можем отметить влияние каждой из них.

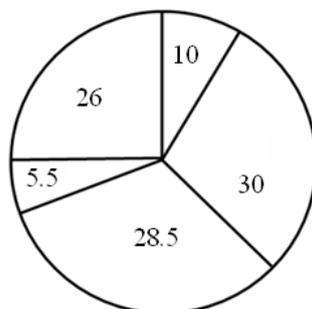


Рисунок 4 – Иллюстрация распределения секторов на рулетке
Figure 4 – Distribution of sectors on roulette

Происходит процесс вращения такого колеса рулетки. Мы основываемся на том, что вероятность осуществления выбора по конкретной особи в ходе воспроизводства будет пропорциональной ее приспособленности: $F_{\text{прис.}} = P_i$, при этом P_i определялась в ходе вращения колеса рулетки.

В таких случаях существует возможность по выбору в рамках соответствующего сектора. Для чего это необходимо? На этой основе ведется выбор хромосомы. Будем предполагать, что для колеса мы наблюдаем 16 вращений. При реализации выбора хромосом мы будем иметь их в количестве 16. Важно среди них осуществить отбор таких, которые будут применяться в ходе моделирования. Среди них будут формироваться 5 пар на основе случайного закона. Затем будет реализоваться процесс скрещивания. Результаты моделирования мы можем увидеть в *Таблице 3*.

Таблица 3 – Иллюстрация того, как были отобраны хромосомы с использованием метода колеса рулетки

Table 3 – Chromosomes selected using the roulette wheel method

Значение номера i отца	Значение номера i матери
3	3
1	3
2	5
2	1
5	5

Дадим анализ тех результатов, которые были получены. Из данных Таблицы 2 следует, что хромосома 4 никогда не была отобрана для скрещивания, в то время как другие хромосомы были выбраны, по крайней мере, один раз. Хромосомы 2, 3 и 5 были наиболее часто выбираемыми. Что стало причиной такой частой выборки данных хромосом? Анализ показывает, что для них наблюдались высокие значения ОП.

Целевая функция при решении оптимизационной задачи была выбрана следующим образом:

$$F_{\text{цел}} = \min(\sigma_{\text{двум}}(f, \theta) - (\sigma_{\text{двум}}(\text{var}(f), \text{var}(\theta))), \quad (10)$$

где f – частота электромагнитной волны, θ – угол, под которым наблюдается дифракционная структура. Решаемая оптимизационная задача являлась двумерной.

Есть возможность для оценки значения средней ошибки. В результате анализа мы установили, что по популяции потомков значение средней ошибки равнялось 32. Значение ошибки было больше в начале моделирования. Когда рассматривалась первоначальная популяция, тогда она равнялась 51.

Достоинство предлагаемого способа заключается в возможностях его использования для достаточно широкого класса электродинамических структур, на которых находятся диэлектрические материалы [10].

Результаты

При тестировании разработанного алгоритма решения электродинамической задачи (1)-(7) было проведено сравнение с результатами [3], которые дает прямоугольная пластина, размеры которой находились в резонансной области. ЭПР полости составило 50дБ, а представленная в статье структура составила 49дБ, что укладывается в экспериментальную погрешность. Кроме того, проверялись результаты на сходимость. Это позволяет утверждать, что полученные результаты являются достоверными.

Был реализован процесс моделирования структуры, которая приведена на Рисунке 5. Размеры структуры были следующие: $T=1.5\lambda$, $D_1=3.5\lambda$, $D_2=2.5\lambda$, $D_3=2.2\lambda$, $d_1=0.1\lambda$, $d_2=0.075\lambda$, $d_3=0.085\lambda$, $V_1=1.5\lambda$, $V_2=2.5\lambda$, $V_3=2.2\lambda$, $L_1=3.5\lambda$, $L_2=3.6\lambda$, $L_3=3.7\lambda$, $P_1=1.5\lambda$, $P_2=2.5\lambda$. Диэлектрическая проницаемость диэлектрических включений была выбрана: $\epsilon=0.12-j0.35$. Мы продемонстрировали, что оптимизационные процедуры позволяют достигать значения ЭПР, не превышающего 19 дБ при угле наблюдения в 25° , когда применяется частота 8 ГГц. То есть, можно решать задачи, которые связаны с тем, что уменьшаются помехи, происходит улучшение электромагнитной совместимости.

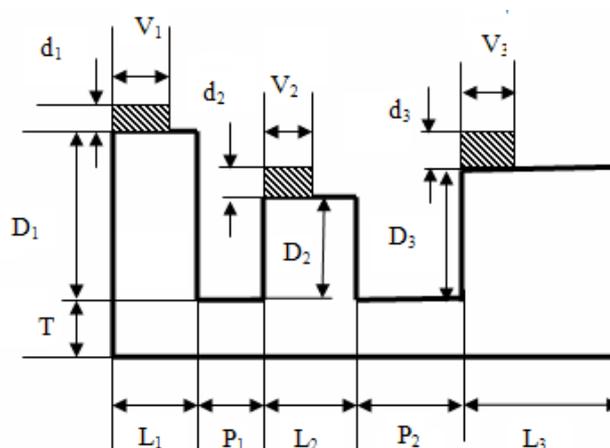


Рисунок 4 – Иллюстрация электродинамической структуры, для которой проводились расчеты
Figure 4 – Electrodynamic structure for which calculations were carried out

Заключение

В данной работе была исследована возможность моделирования рассеяния электромагнитных волн на электродинамических структурах, содержащих диэлектрические включения. Путем использования метода интегральных уравнений был разработан алгоритм (1)-(7) для расчета рассеянных полей и эффективной площади рассеяния (ЭПР). Предложено применять генетический алгоритм для оптимизации значений рассеянных полей для заданных направлений наблюдения. Новизна предлагаемого подхода заключается в комбинации алгоритма расчета рассеянных полей и генетического алгоритма. Получены результаты, демонстрирующие работоспособность предлагаемых подходов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Панарин Д.Г. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на электродинамических объектах с использованием модифицированного метода моментов. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2016;14(3). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/10/Panarin_3_16_1.pdf.
2. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. [и др.]. *Биоинспирированные методы в оптимизации*. М.: Физматлит; 2009. 384 с.
3. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1990;38(9):1413–1420.
4. Максимова А.А., Юрочкин А.Г. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2016;10(1):53–56.
5. Глотова Т.В., Мельникова Т.В. Решение задачи рассеяния электромагнитных волн на магнито-диэлектрическом объекте на основе адаптивного метода. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2016;13(2). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/06/GlotovaMelnikova_2_16_2.pdf.
6. Антипов С.А., Володько А.В., Ищенко Е.А. [и др.]. Исследование влияния диэлектрической проницаемости материала на эффективную площадь рассеяния. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2020;16(5):98–101.
7. Печеркин В.Я., Василяк Л.М., Ветчинин С.П. [и др.]. Резонансное рассеяние плоских электромагнитных волн диэлектрическим эллипсом. *Прикладная физика*. 2019;4:5–10.
8. Дудрин Д.А. Модель рассеяния электромагнитных волн на статистически неровной поверхности. *T-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*. 2015;9(9):48–53.
9. Сергеев А.В., Бешер Х.И. Рассеивающие свойства отражателя с магнито-диэлектрическим материалом. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2016;10(4):18–21.
10. Максимова А.А. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на неоднородных магнито-диэлектрических телах. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2015;11(4). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2015/12/Maksimova_4_15_1.pdf.
11. Клименко Ю.А., Мельникова Т.В., Преображенский А.П. Исследование особенностей распространения электромагнитных волн. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2021;38(3):22–25.

REFERENCES

1. Panarin D.G. Modeling of electromagnetic wave scattering on electrodynamic objects using a modified method of moments. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, optimization and information technology*. 2016;14(3). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/10/Panarin_3_16_1.pdf. (In Russ.).
2. Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M. [et all]. *Bioinspired methods in optimization*. Moscow, Fizmatlit; 2009. 384 p. (In Russ.).
3. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1990;38(9):1413–1420.
4. Maksimova A.A., Yurochkin A.G. Methods for studying the characteristics of electromagnetic wave scattering by objects. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tekhnologij = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2016;10(1):53–56. (In Russ.).
5. Glotova T.V., Melnikova T.V. Solving the problem of scattering electromagnetic waves on a magneto-dielectric object based on the adaptive method. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2016;13(2). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2016/06/GlotovaMelnikova_2_16_2.pdf. (In Russ.).
6. Antipov S.A., Volodko A.V., Ishchenko E.A. [et all]. Investigation of the effect of the dielectric permittivity of a material on the effective scattering area. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Voronezh State Technical University*. 2020;16(5):98–101. (In Russ.).
7. Pecherkin V.Ya., Vasilyak L.M., Vetchinin S.P. [et all]. Resonant scattering of plane electromagnetic waves by a dielectric ellipse. *Prikladnaya fizika = Applied physics*. 2019;4:5–10. (In Russ.).
8. Dudrin D.A. Model of electromagnetic wave scattering on a statistically uneven surface. *T-Comm: Telekommunikacii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*. 2015;9(9):48–53. (In Russ.).
9. Sergeev A.V., Beshler H.I. Scattering properties of a reflector with a magneto-dielectric material. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tekhnologij = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2016;10(4):18–21. (In Russ.).
10. Maksimova A.A. Modeling of electromagnetic wave scattering on inhomogeneous magneto-dielectric bodies. *Modelirovanie, optimizaciya i informacionnye tekhnologii = Modeling, Optimization and Information Technology*. 2015;11(4). URL: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2015/12/Maksimova_4_15_1.pdf. (In Russ.).
11. Klimenko Y.A., Melnikova T.V., Preobrazhensky A.P. Investigation of the features of electromagnetic wave propagation. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokih tekhnologij = Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies*. 2021;38(3):22–25. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аветисян Татьяна Владимировна, Tatiana V. Avetisyan, Lecturer, College of преподаватель, Колледж Воронежского Voronezh Institute of High Technologies, института высоких технологий, Воронеж, Voronezh, the Russian Federation. Российская Федерация.
e-mail: vtatyana.avetisyan@mail.ru

Львович Яков Евсеевич, Yakov E. Lvovich, Doctor of Technical доктор технических наук, профессор, Sciences, Professor, Воронежский институт высоких технологий, Voronezh Institute of High Technologies, Воронеж, Российская Федерация. Voronezh, the Russian Federation.

e-mail: office@vvt.ru

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

e-mail: app@vvt.ru

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

Статья поступила в редакцию 22.06.2023; одобрена после рецензирования 06.10.2023; принята к публикации 06.12.2023.

The article was submitted 22.06.2023; approved after reviewing 06.10.2023; accepted for publication 06.12.2023.