

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2021.5.1.004

УДК 621.396

Исследование характеристик сложных дифракционных структур на основе комбинированного подхода

И. Я. Львович¹, Я. Е. Львович², А. П. Преображенский¹,
Ю. П. Преображенский¹, О. Н. Чопоров² ✉

¹ Воронежский институт высоких технологий,
Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А

² Воронежский государственный технический университет,
Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

✉ choporov_oleg@mail.ru

Аннотация

В работе проводится исследование электродинамических структур, в состав которых входят металлические и диэлектрические элементы. Расчет простых элементов осуществляется при помощи метода интегральных уравнений. Проводится их решение на базе метода коллокаций и определяются рассеянные электромагнитные поля. Для того чтобы сложные электродинамические структуры обладали требуемыми рассеивающими характеристиками, проводится выбор дифракционных элементов в рамках многоальтернативного оптимизационного подхода. Приведен пример исследуемой электродинамической структуры. Продемонстрировано определение ее характеристик.

Ключевые слова

электромагнитная дифракция, электродинамика структура, методы оптимизации

Для цитирования

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. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.004.

© Львович И. Я., Львович Я. Е., Преображенский А. П.,
Преображенский Ю. П., Чопоров О. Н.

Investigation of the characteristics of complex diffractive structures based on a combined approach

I. Ya. Lvovich¹, Ya. E. Lvovich², A. P. Preobrazhenskiy¹,
Yu. P. Preobrazhenskiy¹, O. N. Choporov²✉

¹ Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh,
394043, Russia

² Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh,
394006, Russia

✉ choporov_oleg@mail.ru

Abstract

The paper is devoted to the study of electrodynamic structures, which include metal and dielectric elements. Simple elements are calculated using the method of integral equations. Their solution is determined by the collocation method and scattered electromagnetic fields. The finite-difference method is required for calculating the equation. For required scattering characteristics of complex electrodynamic structures the choice of diffraction elements is carried out within the framework of a multi-alternative optimization approach. The individual electrodynamic components are considered first. Then, on their basis, several promising variants of more complex subsystems are formed. It is necessary to apply training information on every stage of modeling. The example of the investigated electrodynamic structure is given. The definition of its characteristics is demonstrated.

Keywords

electromagnetic diffraction, electrodynamics, optimization methods

For citation

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.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.004.

Введение

В настоящее время активным образом развиваются системы связи в различных диапазонах. Для того чтобы обеспечить требуемые характеристики сложных электродинамических устройств, необходимо использовать соответствующие модели и алгоритмы. Они ориентированы на применение самой современной компьютерной техники. Уже в течение нескольких десятилетий при создании систем связи используют САПР [1]. Но они в общем случае требуют очень больших вычислительных затрат. Это определяет необходимость создания таких алгоритмов и подхо-

дов, которые за приемлемое с точки зрения практики время позволили бы разрабатывать компоненты систем связи.

Цель данной работы состоит в разработке комплексного подхода, на основе которого можно создавать электродинамические структуры, состоящие из металлических и диэлектрических компонентов с заданными требованиями на уровень рассеянных полей [2; 3].

Модель расчета электродинамической компоненты

При расчете рассеянных полей от комбинированной электродинамической структуры, содержащей металлические и диэлектрические компоненты, мы использовали интегральное уравнение:

$$\vec{n} \times \vec{E} = -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \vec{n} \times \times \int_S (-\omega^2 \cdot \mu \cdot \vec{J} \cdot G + Z \cdot \vec{n} \times \vec{J} \times \overrightarrow{\text{grad}}'(G) - \frac{i}{\omega\epsilon} \text{Div}(\vec{J}) \cdot \overrightarrow{\text{grad}}'(G)) ds'. \quad (1)$$

В этом уравнении использовано несколько обозначений. Например, \vec{n} – показывает, как направлена внешняя нормаль к компоненте. Электрическая напряженность обозначается как \vec{E} . Электромагнитная волна характеризуется частотой ω . Металлодиэлектрическая компонента характеризуется ϵ и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость. Для области интегрирования поверхностная плотность тока – \vec{J} . Обозначение трехмерной функции Грина – G . Когда интегрируем по определенному контуру, то для него будет импеданс Z . При интегрировании по поверхности обозначаем ее S .

Решение интегрального уравнения проводится на базе численного метода [4]. Получается система алгебраических уравнений с матрицей размером $N \times N$. При этом N – число точек на поверхности анализируемой электродинамической компоненты.

Также в ходе решения уравнения требуется использование конечно-разностного метода. При расчетах $\text{Div}(\vec{J})$, чтобы упростить расчеты, будем рассматривать индекс, который является двойным: $j \rightarrow (m, p)$. После преобразований дивергенция \vec{J} записывается как

$$\begin{aligned} \text{Div}(\vec{J}_{m,p}) = & \frac{\partial J_x}{\partial x} + \frac{\partial J_y}{\partial y} + \frac{\partial J_z}{\partial z} \approx \frac{J_{x_{m+1,p}} - J_{x_{m-1,p}}}{2 \cdot \Delta x} + \\ & + \frac{J_{y_{m,p+1}} - J_{y_{m,p-1}}}{2 \cdot \Delta y} + \frac{J_{z_{m,p+1}} - J_{z_{m,p-1}}}{2 \cdot \Delta z}. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом по разным координатам будут соответствующие интервалы дискретизации – Δx , Δy , Δz .

В методе коллокаций компоненты функции Грина:

$$G_{ij} = \frac{\exp(-ik_{\ell}r_{ij})}{r_{ij}}. \quad (3)$$

Если поверхность компоненты металлическая, то $k_{\ell} = 2\pi/\lambda$.
Если поверхность компоненты диэлектрическая, то $k_{\ell} = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$.

После преобразований градиент функции Грина записывается для каждой из составляющих:

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial x'_{ij}} &= -(x_i - x_j) \frac{1 + ik_{\ell}r_{ij}}{r_{ij}^3} \exp(-ik_{\ell}r_{ij}); \\ \frac{\partial G}{\partial y'_{ij}} &= -(y_i - y_j) \frac{1 + ik_{\ell}r_{ij}}{r_{ij}^3} \exp(-ik_{\ell}r_{ij}); \\ \frac{\partial G}{\partial z'_{ij}} &= -(z_i - z_j) \frac{1 + ik_{\ell}r_{ij}}{r_{ij}^3} \exp(-ik_{\ell}r_{ij}). \end{aligned} \quad (4)$$

Индекс i соответствует точке наблюдения. Индексом j соответствует точке интегрирования. Индексы изменяются так: $i, j = 1 \dots N$.

Когда формируется модель, тогда мы в уравнении используем разложение токов при помощи кусочно-постоянных функций. От интегрального уравнения мы приходим к системе уравнений:

$$\begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Поверхность анализируемой дифракционной структуры характеризуется нормалью

$$\vec{n} = \vec{x}_0 \cdot nx + \vec{y}_0 \cdot ny + \vec{z}_0 \cdot nz. \quad (6)$$

Для правой части системы уравнений записываем:

$$R = \begin{bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{bmatrix};$$

$$Rx_i = ny_i Ez_i - nz_i Ey_i; \quad (7)$$

$$Ry_i = -(nx_i Ez_i - nz_i Ex_i);$$

$$Rz_i = nx_i Ey_i - ny_i Ex_i.$$

Для расчета элементов матрицы мы запишем:

$$\begin{aligned}
Ux_{ij} &= Um_{xx_{ij}} + Ud_{xx_{ij}}; \quad Ux_{ij} = Um_{xy_{ij}} + Ud_{xy_{ij}}; \quad Ux_{ij} = Um_{xz_{ij}} + Ud_{xz_{ij}}; \\
Uy_{ij} &= Um_{yx_{ij}} + Ud_{yx_{ij}}; \quad Uy_{ij} = Um_{yy_{ij}} + Ud_{yy_{ij}}; \quad Uy_{ij} = Um_{yz_{ij}} + Ud_{yz_{ij}}; \quad (8) \\
Uz_{ij} &= Um_{zx_{ij}} + Ud_{zx_{ij}}; \quad Uz_{ij} = Um_{zy_{ij}} + Ud_{zy_{ij}}; \quad Uz_{ij} = Um_{zz_{ij}} + Ud_{zz_{ij}}.
\end{aligned}$$

Обозначение m относится к контуру, который проходит по металлу, обозначение d относится к контуру, который проходит по диэлектрику.

Когда осуществляется интегрирование, тогда те токи, которые связаны с индексами i и j , необходимо соотнести с индексами (m, p) .

Для элементов матрицы, которые соответствуют металлической поверхности:

$$\begin{aligned}
Um_{xx_{ij}} &= -Z \cdot \frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(ny_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + nz_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \\
&\quad \left. + \frac{i}{\omega\epsilon Z} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \right) ds; \\
Um_{xy_{ij}} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-nz_i i\omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(ny_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + nz_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) \right) + \frac{i}{\omega\epsilon} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta y} \right) ds; \\
Um_{xz_{ij}} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-ny_i i\omega^2 \mu G_{ij} + Z ny_i nx_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) ds; \\
Um_{yx_{ij}} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(nz_i i\omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(nx_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + nz_i \left(-nz_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \right) \right) - \frac{i}{\omega\epsilon} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta x} \right) ds; \\
Um_{yy_{ij}} &= -Z \frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-nx_i ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} + nz_i nx_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} - \frac{i}{\omega\epsilon Z} \cdot nz_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \Delta y} \right) ds; \\
Um_{yz_{ij}} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-nx_i i\omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(nx_i nx_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} + nz_i nx_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} \right) \right) ds; \\
Um_{zx_{ij}} &= -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(-ny_i i\omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(-nx_i \left(ny_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + ny_i \left(-nz_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - ny_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \right) \right) \right) ds;
\end{aligned} \tag{9}$$

$$Umzy_{ij} = -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S \left(nx_i \omega^2 \mu G_{ij} + Z \left(-nx_i \left(-nz_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} - nx_i \frac{\partial G}{\partial x_{ij}} \right) + ny_i nx_i \frac{\partial G}{\partial y_{ij}} \right) \right) ds;$$

$$Umzz_{ij} = -\frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \cdot \int_S Z ny_i nx_i \frac{\partial G}{\partial z_{ij}} ds.$$

Для диэлектрических объектов элементы матриц рассчитываются аналогичным образом. Волновое число k_ℓ будет зависеть от того, какая поверхность анализируется.

Для расчета рассеянного поля мы используем выражение

$$E^S(\vec{r}) = \frac{i\omega\mu \exp(-ikr)}{r} \int_S ((\hat{r} \cdot \vec{J})\hat{r} - \vec{J} - \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} \cdot \vec{Z} \cdot \vec{n} \times \vec{J} \times \hat{r}) \exp(ik\hat{r}\vec{r}') dS'. \quad (10)$$

где \hat{r} -вектор, который характеризуется единичной длиной и направлен от точки интегрирования к точке, в которой наблюдаем; $\vec{r}' = x_0 \cdot x' + y_0 \cdot y' + z_0 \cdot z'$ – радиус-вектор, который относится к точке интегрирования.

Для того чтобы рассчитать характеристики дифракционной структуры, необходимо опираться на такой алгоритм:

1. Задаем координаты дифракционного элемента.
2. Записываем интегральное уравнение, которое дискретизируется с учетом этих координат.
3. Решаем систему уравнений, определяем токи.
4. Рассчитываем рассеянное поле.

Модель выбора дифракционных элементов, основанная на многоальтернативной оптимизации

Проектирование электродинамических устройств в современных условиях носит комплексный характер. Оно использует типовые решения как в области программного, так и технического обеспечения. Могут применяться различные подходы, которые продемонстрировали эффективные характеристики для других систем, которые работают по похожим принципам [5]. Тогда типовые решения могут переноситься. Не всегда можно обеспечить соответствующие высокие уровни эффективности. Анализ показывает, почему это может быть. Причины могут быть, например, такие:

- 1) не всегда рассматриваются все варианты в возможном множестве решений;
- 2) может происходить преобразование отдельных подсистем и алгоритмов. Но не во всех случаях они могут быть полноценным способом интегрированы в общие системы. В целом систе-

мы будут функционировать неопределенным образом. Частичное преобразование подсистем и алгоритмов связано с тем, какие экономические возможности;

3) усложнение разрабатываемых подсистем ведет к необходимости повышения квалификации тех, кто с ними будет работать. А такой процесс обучения пользователей и проектировщиков не всегда реализуется.

То есть существуют проблемы в преобразованиях подсистем и алгоритмов. В большой мере они могут быть решены на основе многоальтернативной оптимизации. Какие результаты могут быть получены на основе указанного подхода? С одной стороны, существуют ограниченные ресурсы, связанные с размерами анализируемых электродинамических компонентов, значениями рассеянных электромагнитных полей. С другой – существуют ресурсы, которые распределены во времени. При решении обозначенных задач можно применять параллельные подходы и опираться на сравнительные оценки по альтернативным проектам преобразований. Существует процесс активного преобразования. Базируется он на том, что вначале рассматриваются отдельные электродинамические компоненты. Затем на их основе происходит формирование нескольких перспективных вариантов более сложных подсистем [6]. На каждом из этапов моделирования необходимо применять обучающую информацию.

Пусть у нас есть совокупность электродинамических компонентов. Нам необходимо решить задачу активного преобразования. Для этого требуется обосновать математические приемы суперпозиции общей электродинамической системы. Совокупность электродинамических компонентов представим как нумерованные множества.

Множества проводящих электродинамических компонентов:

$$\delta_{rj} = (\overline{1, R_j}; \overline{v_j}), \quad j = \overline{1, J}, \quad (11)$$

здесь v_j – рассматривается в виде нумерации множества $\overline{1, R_j}$. Множества электродинамических компонентов, которые поглощают электромагнитные излучения:

$$\delta_{vt} = (\overline{1, V_t}; \overline{v_e}), \quad t = \overline{1, T}, \quad (12)$$

здесь v_t – рассматривается в виде нумерации множества $\overline{1, V_t}$.

Отношения между указанными множествами электродинамических компонентов могут быть обозначены при помощи множества S . Исходим из того, что множества R и V не будут являться пустыми:

$$\delta_s = (S, v_s), \quad \delta_s = \delta_R \times \delta_v. \quad (13)$$

В указанном выражении мы рассматриваем $\underline{v_s}$ как нумерацию множества S , $\delta_R = \times \{\delta_{rj} : j = 1, J\}$, $\delta_v = \times \{\delta_{vt} : t = 1, T\}$. Если рассматривать множество S_l , то оно будет состояться как список элементов большой электродинамической системы $W_g = (g = 1, G)$, $\delta_w = (W_1, W_G; v_g)$.

Если рассматривать отдельные электродинамические подсистемы, тогда v_g будет рассматриваться в виде нумерации множества S_l . В режиме активных преобразований происходит формирование общей электродинамической структуры. Тогда должны быть обозначены переходы к связям компонентов в множестве δ_s к компонентам в множестве δ_w . В итоге будет получаться семейство морфизмов из δ_s в δ_w – $Mor(\delta_s, \delta_w)$.

Происходят процедуры оптимального синтеза. Они обуславливают создание преобразований $Mor(\delta_s, \delta_w)$. При этом есть определенный порядок (нумерации) v^* . После этого обеспечиваются самое лучшее выполнение заданных требований $F_i (i = 1, I)$ относительно компонентов в электродинамической системе. Пусть любые из нумераций множеств $Mor(\delta_s, \delta_w)$ будут рассматриваться как v . Тогда оптимальный выбор будет связан с проведением преобразования $v = v^*h$. В ходе анализа h рассматривается как общерекурсивная функция. При реализации алгоритма будет проводиться переход от v к основной вычислимой нумерации.

Видно, как решать обобщенную задачу оптимального синтеза. Основные ее шаги связаны с тем, что необходимо решать проблему определения основной вычислимой нумерации по множествам $Mor(\delta_s, \delta_w)$. Исследователями отмечается проблема P для пары (δ_s, δ_w) .

Пусть $\delta_w(W_1, W_G; v_g^*)$ рассматривается в виде конечного нумерованного множества. Считаем, что в нем v_g^* будет основной нумерацией. Она может быть по определенному частичному порядку относительно списка S_l . Осуществляемые процедуры будут справедливыми [7] в рамках любого из нумерованных множеств δ_s . При этом будут выполняться требования по конечности множества $Mor(\delta_s, \delta_w)$. Тогда можно будет сделать вывод о том, что проблема P при анализе пары (δ_s, δ_w) будет разрешимой. Если проблема P для (δ_s, δ_w) рассматривается в виде разрешимой, тогда для нумерованного множества $Mor((\delta_s, \delta_w), v^*)$ рассматривается обозначение $Mor(\delta_s, \delta_w)$.

Осуществим процедуру преобразования $Mor(\delta_s, \delta_w)$, основываясь на том, что выполняется принцип эквивалентности:

$$Mor(\delta_s, \delta_w) \sim Mor(\delta_R, \delta_v, \delta_w) \sim Mor(\delta_R, Mor(\delta_v, \delta_w)). \quad (14)$$

Проведем переобозначение множеств, следующим образом

$$Mor(\delta_v, \delta_w) = \delta_{vw},$$

$$L_{j-1} = \times \{\delta_{rj} : j = \overline{1, J-1}\} \text{ исходим из того, что } \delta_R = \delta_{j-1} \times \delta_{rj}. \quad (15)$$

После этого (14) будет записано так

$$\begin{aligned} Mor(\delta_R, Mor(\delta_v, \delta_w)) &\sim Mor(\delta_R, \delta_{vw}) \sim \\ &\sim Mor(\delta_{j-1} \times \delta_{rj}, \delta_{vw}) \sim Mor(\delta_{j-1}, \delta_{vw}). \end{aligned} \quad (16)$$

Если ввести еще одно обозначение

$$\begin{aligned} Mor(\delta_{rj}, \delta_{vw}) &= \delta_{rj, vw}, \\ \delta_{j-2} &= \times \{\delta_{rj} : j = \overline{1, J-2}\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Тогда, как и в (16) мы запишем

$$Mor(\delta_{J-1}, Mor(\delta_{rJ}, \delta_{vw})) \sim Mor(\delta_{J-2}, Mor(\delta_{r(J-2)}, \delta_{rJ, vw})). \quad (18)$$

Если осуществить итеративную процедуру (2) до $j = I$, тогда мы получим результат

$$Mor(\delta_2, Mor(\delta_{r3}, \delta_{rJ, \dots, r3, vw})) \sim Mor(\delta_{r1}, Mor(\delta_{r2}, \delta_{rJ, \dots, r2, vw})). \quad (19)$$

Если анализировать j -й этап, тогда для преобразования (10) мы запишем

$$Mor(\delta_j, Mor(\delta_{r(j+1)}, \delta_{rJ, \dots, r(j+1), vw})) \sim Mor(\delta_{j-1}, Mor(\delta_{rj}, \delta_{rJ, \dots, rj, vw})). \quad (20)$$

Преобразование вида (4) можно провести для множества $Mor(\delta_v, \delta_w)$. Причем на t -м этапе отношение эквивалентности запишется следующим образом

$$Mor(\delta_t, Mor(\delta_{v(t+1)}, \delta_{vt, \dots, v(t+1), w})) \sim Mor(\delta_{vt}, Mor(\delta_{vt}, \delta_{vt, \dots, vt, w})). \quad (21)$$

В указанном выражении $\delta_t = \times \{\delta_\tau : \tau = \overline{1, t}\}$. Получение множеств $\delta_{vT, \dots, v(t+1)}$, $\delta_{vT, \dots, vt, w}$ происходит также, как и для выражения (19).

Построение алгоритма для того, чтобы разрешать проблему P по паре (δ_s, δ_w) состоит из таких шагов:

1) основные нумерации v_j^* в морфизмах $Mor(\delta_{rj}, \delta_{rJ, \dots, rj, vw})$, $(j = \overline{1, J})$ будут определены. Это важно, чтобы соблюдать требования (20) и работу с v_t^* морфизмами на базе (21);

2) осуществление расчетов по $Mor(\delta_s, \delta_w)$;

3) определение основной нумерации v_g^* по множествам $\delta_w = (W_1, W_G; v_g)$. Тогда в итоге будут осуществлены расчеты по (20), (21) с учетом $v_j = v_j^*$, $v_t = v_t^*$ и $v_g = v_g^*$.

Многоальтернативная оптимизация [8; 9] в рамках активных преобразований будет проводится с учетом того, что в ней будут применяться альтернативные переменные:

$$x_m = \begin{cases} 1, & \text{если на определенном временном периоде} \\ & \text{осуществляется преобразование } t\text{-й подсистемы;} \\ 0, & \text{в противном случае, } t = \overline{1, M}; \end{cases} \quad (22)$$

$$x_{nm} = \begin{cases} 1, & \text{если в качестве аналога } m\text{-й подсистемы} \\ & \text{используется } n_m\text{-е типовое решение;} \\ 0, & \text{в противном случае, } n_m = \overline{1, N_m}, \end{cases} \quad (23)$$

В последнем выражении N_m показывает число типовых решений. Они соответствуют определенной m -й подсистеме, когда осуществляется процесс преобразований.

За счет анализа (22), (23) есть возможности, основываясь на соответствующих требованиях, проводить процедуры комбинаторного выбора.

В ходе моделирования есть ограничения по времени. Но задача состоит в том, чтобы к преобразованиям привлекались больше электродинамических подсистем. Это демонстрирует такое выражение

$$\sum_{m=1}^M a_m x_m \rightarrow \max. \quad (24)$$

В указанном выражении a_m является коэффициентом. Он показывает, какая из m -х электродинамических подсистем будет применяться в первую очередь.

Еще одним практически важным требованием является ограничение по размерам. Они соответствуют параметру C :

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n_m=1}^{N_m} C_{nm} X_m X_{nm} \leq C. \quad (25)$$

Здесь C_{nm} – соответствует размеру n_m -й электродинамической подсистеме при взаимодействии с m -й подсистемой.

После учета всех шагов в целом электродинамическая система с точки зрения выбора ее отдельных элементов, строится на базе многоальтернативного оптимизационного подхода [10]:

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M a_m x_m \rightarrow \max; \\ & \sum_{m=1}^M \sum_{n_m=1}^{N_m} C_{nm} X_m X_{nm} \leq C; \\ & X_m = \begin{cases} 1, \\ m = \overline{1, M}; \\ 0, \end{cases} \\ & X_{nm} = \begin{cases} 1, \\ n_m = \overline{1, N_m}, \quad \sum_{n_m=1}^{N_m} Z_{mn} = 1. \\ 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (26)$$

Результаты

На рис. 1 приведен пример исследуемой электродинамической структуры.

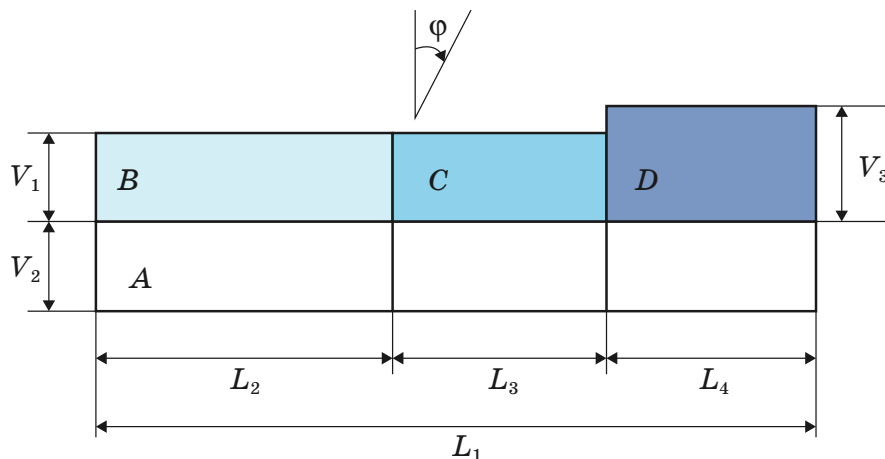


Рис. 1. Пример оптимизированной электродинамической структуры
Fig. 1. Example of the optimized electrodynamic structure

Компонента A является металлической. Компоненты B , C , D являются диэлектрическими. Размеры структуры были следующими: $L_1 = 11,9\lambda$, $L_2 = 5,9\lambda$, $L_3 = 2\lambda$, $L_4 = 6\lambda$, $V_1 = 3,1\lambda$, $V_2 = 2,5\lambda$. Для структур B и характеристики были следующими: $\varepsilon_B = 1,2 - j \cdot 3$, $\mu_B = 1,3 - j \cdot 4$, $\varepsilon_C = 2,3 - j \cdot 4$, $\mu_C = 1,4 - j \cdot 5$. Необходимо было определить значения других параметров при требованиях значений рассеянного электромагнитного поля менее 10 дБ в секторе углов $0^\circ \leq \varphi \leq 15^\circ$. Дополнительным условием было ограничение $V_3 < 3\lambda$.

В результате использования предлагаемого подхода были определены параметры структуры D : $\varepsilon_D = 2,2 - j \cdot 4,5$, $\mu_D = 2,3 - j \cdot 2,7$, а также размер $V_3 = 2,5\lambda$.

Заключение

В работе предложен комплексный подход, базирующийся на комбинации метода интегральных уравнений и методов многоальтернативной оптимизации. На его основе продемонстрированы возможности для проектирования и создания сложных электродинамических структур с заданными требованиями на характеристики рассеяния. Приведен пример использования предлагаемого подхода.

Список литературы

1. Преображенский А.П. *Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн*. Воронеж; 2007. 248 с.

2. Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Принятие решения о форме дифракционных структур в задаче рассеяния радиоволн. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):79–87. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-79-87.

3. Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Оптимизация конфигурации электродинамического объекта с требуемыми характеристиками рассеяния. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):97–107. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-97-107.

4. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016;(1):10. Режим доступа: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=264>

5. Львович Я.Е., Львович И.Я., Преображенский А.П. Решение задач оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн на дифракционных структурах при их проектировании. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2010;(6):255–256.

6. Сорокин С.О. Оптимизационное моделирование функционирования системы однородных объектов в многоаспектной цифровой среде. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(3):153–164. Режим доступа: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=503>

7. Орлова Д.Е. Устойчивость решений при обеспечении функционирования организационно-технических систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2018;6(1):325–336. Режим доступа: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=451>

8. Neittaanmäki P., Repin S., Tuovinen T. (eds). *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures; Series: Computational Methods in Applied Sciences*. Springer International Publishing AG, Switzerland; 2016. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783319235639>

9. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах. *Вестник Воронежского института высоких технологий*. 2013;(10):20–26.

10. Львович Я.Е., Питолин А.В., Сорокин С.О. Оптимизация проектирования многоаспектной цифровой среды системы однородных объектов на основе процедур декомпозиции и агрегации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2019;7(2):186–195. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.024.

References

1. Preobrazhensky A.P. *Modeling and algorithmic analysis of diffraction structures in CAD of radar antennas*. Voronezh; 2007. 248 p. (In Russ.)

2. Preobrazhenskiy A.P., Choporov O.N. The decision of form for diffractive structures in the problem of scattering of radio waves. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):79–87. (In Russ.) DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-79-87.

3. Preobrazhensky A.P., Choporov O.N. The optimization of electrodynamic configuration object with the desired characteristics of

scattering. *International Journal of Advanced Studies*. 2016;6(2):97–107. (In Russ.) DOI: 10.12731/2227-930X-2016-2-97-107.

4. Scherbatykh S.S. The possibility of using the method of integral equations as the basic approach in CAD systems antennas. *Scientific Journal Modeling, Optimization and Information Technology*. 2016;(1):10. (In Russ.) Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=264>

5. Lvovich Ya.E., Lvovich I.Ya., Preobrazhensky A.P. Solving the problems of evaluating the characteristics of scattering of electromagnetic waves on diffractive structures during their design. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*. 2010;(6):255–256. (In Russ.)

6. Sorokin S.O. Optimization modeling of the functioning of the system of homogeneous objects in a multidimensional digital environment. *Modeling, Optimization and Information Technologies*. 2018;6(3):153–164. (In Russ.) Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=503>

7. Orlova D.E. Stability of solutions in ensuring the functioning of organizational and technical systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2018;6(1):325–336. (In Russ.) Available at: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=451>

8. Neittaanmäki P., Repin S., Tuovinen T. (eds). *Mathematical Modeling and Optimization of Complex Structures; Series: Computational Methods in Applied Sciences*. Springer International Publishing AG, Switzerland; 2016. Available at: <https://www.springer.com/gp/book/9783319235639>

9. Erasov S.V. The optimization processes of the electrodynamic problems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*. 2013;(10):20–26. (In Russ.)

10. Lvovich Ya.E., Pitolin A.V., Sorokin S.O. Multi-aspect digital environment design optimization of homogeneous objects system based on the procedures of decomposition and aggregation. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2019;7(2):186–195. (In Russ.) DOI: 10.26102/2310-6018/2019.25.2.024.

Информация об авторах

Львович Игорь Яковлевич, доктор технических наук, ректор Воронежского института высоких технологий, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А; e-mail: office@vvt.ru

Львович Яков Евсеевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования и информационных систем Воронежского государственного технического университета, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем и технологий Воронежского института высоких технологий, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А; e-mail: Komkovvvt@yandex.ru

Преображенский Юрий Петрович, канд. техн. наук, профессор кафедры информационных систем и технологий Воронежского института высоких технологий, Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73А; e-mail: petrovich@vvt.ru

Чопоров Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем информационной безопасности Воронежского государственного технического университета, Россия, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84; e-mail: choporov_oleg@mail.ru

Information about the authors

Igor Ya. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Rector of the Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh, 394043, Russia; e-mail: office@vivt.ru

Yakov E. Lvovich, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Computer Aided Design and Information Systems, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, 394006, Russia

Andrey P. Preobrazhensky, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Systems and Technologies, Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh, 394043, Russia; e-mail: Komkovvivt@yandex.ru

Yuri P. Preobrazhensky, PhD., Professor, Department of Information Systems and Technologies, Voronezh Institute of High Technologies, 73-A Lenina Str., Voronezh, 394043, Russia; e-mail: petrovich@vivt.ru

Oleg N. Choporov, Doctor of Technical Sciences, Department of Information Security Systems, Voronezh State Technical University, 84, 20 let Oktyabrya Str., Voronezh, 394006, Russia; e-mail: choporov_oleg@mail.ru

Поступила / Received: 10.03.2021

Принята в печать / Accepted: 25.03.2021