

УДК 621.396

А.П. Преображенский

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ОБЪЕКТАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ И «МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА»

*Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Россия*

*Современные электродинамические объекты, входящие в состав антенных систем, характеризуются сложной структурой и множеством параметров. Это определяет необходимость использования соответствующих методов, позволяющих проводить синтез таких объектов. В работе предлагается структура подсистемы анализа дифракционных структур антенной системы. Анализ проводится на основе двух подходов. Первый из них базируется на методе интегральных уравнений, с его использованием проводится расчет характеристик рассеяния. Интегральное уравнение решается на основе метода моментов. Второй из них основывается на комбинации муравьиного алгоритма и метода сеток. Для возможного диапазона значений характерных размеров исследуемого объекта был использован метод сеток с последовательным сужением области определяемых значений. Для каждого участка сетки мы применяли муравьиный алгоритм. При анализе характеристик объекта сложной формы мы представляли его в виде совокупности нескольких отражателей, которые не взаимодействуют. Общая характеристика рассеяния зависит от значений характеристик рассеяния каждого отражателя, а также разности фаз по падающим электромагнитным волнам. Проводилось разбиение сектора углов наблюдения на некоторое число участков. Были определены характерные размеры объекта, для которого установлен критерий определяющий, как должны быть распределены средние значения характеристик рассеяния для какого из участков угла наблюдения. Результаты работы могут быть полезны при проектировании электродинамических объектов, имеющих заданные требования по уровню характеристик рассеяния.*

**Ключевые слова:** электродинамическая структура, оптимизация, метод интегральных уравнений, муравьиный алгоритм.

**Введение.** Анализ процессов моделирования рассеяния радиоволн на различных объектах, которые могут входить в состав различной техники, имеет большое значение в связи с необходимостью решения задач радиолокационного распознавания и задач электромагнитной совместимости [1-3].

На настоящий момент известно большое число моделей, на основе которых, в том числе и с привлечением аналитических формул можно проводить оценки характеристик рассеяния различных объектов [4,5].

Для определенных условий необходимо иметь информацию не об угловых зависимостях характеристик рассеяния, а обеспечить их требуемый уровень по заданным секторам углов наблюдения в соответствии с заданными критериями. В тех случаях, когда объекты достаточно простые можно проводить расчет ЭПР (эффективной площади рассеяния) с использованием довольно простых выражений (диск,

пластина и др.) [6, 7]. Но для общего случая при расчете рассеивающих свойств необходимо привлекать численные методы [8].

Представляет интерес провести разработку достаточно простой модели расчета размеров объекта, имеющего требуемые значения в соответствии с заданными критериями важности при определенных секторах углов наблюдения.

Целью работы является разработка комбинированного алгоритма, позволяющего проводить оптимизацию средних значений характеристик сложного объекта для определенных секторов углов наблюдения.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих основных задач:

1. Предложить структуру подсистемы анализа дифракционных структур.
2. Рассмотреть модель расчета рассеивающих характеристик электродинамических объектов, для которых определены ограничения по уровням в заданных секторах наблюдения, на основе комбинации метода интегральных уравнений и “муравьиного” алгоритма.
3. На основе полученных результатов сделать вывод о возможности использования предлагаемого подхода.

**Структура подсистемы анализа дифракционных структур антенной системы.** Убедиться в том, насколько результаты моделирования являются достоверными и надежными, можно на основе осуществления сравнений этих результатов с данными экспериментов. Вследствие того, что есть ограничение по лабораторному пространству, проведение изготовления моделей объектов, которые имеют сложные геометрические формы, может быть весьма дорогостоящим. В этой связи компьютерное моделирование, использование систем автоматизированного проектирования (САПР) во многих случаях представляется, как единственно возможный подход.

На Рисунке 1 предлагается структура подсистемы 1 анализа дифракционных структур, входящих в антенные системы. Форма дифракционных структур может быть достаточно сложной, размеры часто попадают в резонансную область. Исходя из этого, может быть целесообразным при анализе применять метод интегральных уравнений [8].

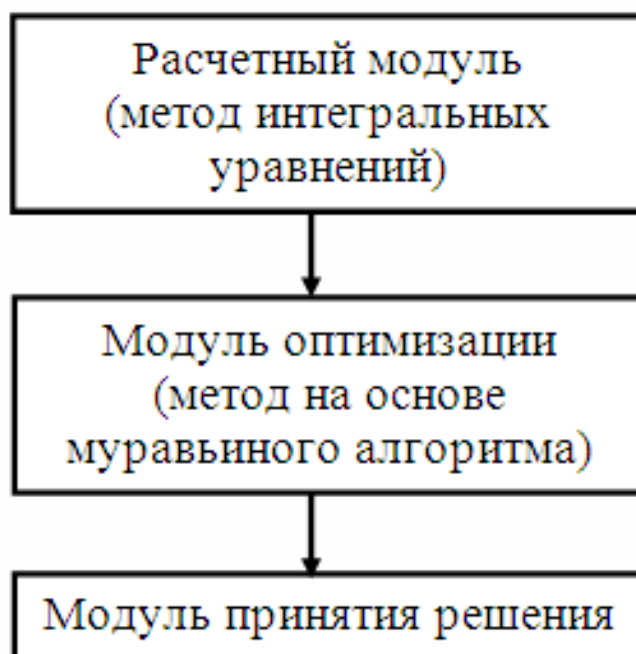


Рисунок 1 - Структура подсистемы анализа дифракционных структур, входящих в антенную систему

Для того, чтобы проводить расчет ЭПР объектов, которые содержат  $N$  отражателей, которые не взаимодействуют, можно использовать подход, связанный с тем, что значения ЭПР для каждого отражателя  $\sigma_i$ , а также разности фаз по падающим электромагнитным волнам известны [9]:

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

где  $\Delta r_{ij} = r_i - r_j$ ,  $r_i$  - является расстоянием между центром  $i$ -го отражателя и точкой наблюдения.

При практическом использовании в качестве достоинства формулы (1) следует отметить то, что применяются аналитические, а не численные методы при расчетах.

**Модель.** Построение модели расчета размеров объекта, для которого заданы требования по тому, как должны быть распределены средние значения характеристик рассеяния для какого из участков угла наблюдения мы проведем для структуры, имеющей в своем составе полость. В состав современных объектов техники входит большое число антенных систем, причем мощность вторичного излучения таких элементов может быть весьма значительной [6].

Нами будет рассматриваться двумерная модель. Из литературных источников известно, что двумерную модель объекта можно применять

при оценке характеристик рассеяния структур, имеющих прямоугольное поперечное сечение [11].

Исследуемая структура приведена на Рисунке 2. Ее характерными размерами являются  $R$ ,  $u$  и угол  $\varphi$ . (Рисунок 2).

При решении задачи угол  $\varphi$  отсчитываем от направления, параллельного направлению АВ.

При анализе характеристик рассеяния сектор углов наблюдения изменялся в достаточно больших пределах:  $10^\circ \leq \Delta\theta \leq 90^\circ$ , мы рассматривали область передней полусферы. Характеристики рассеяния рассчитывались на базе метода интегральных уравнений [8].

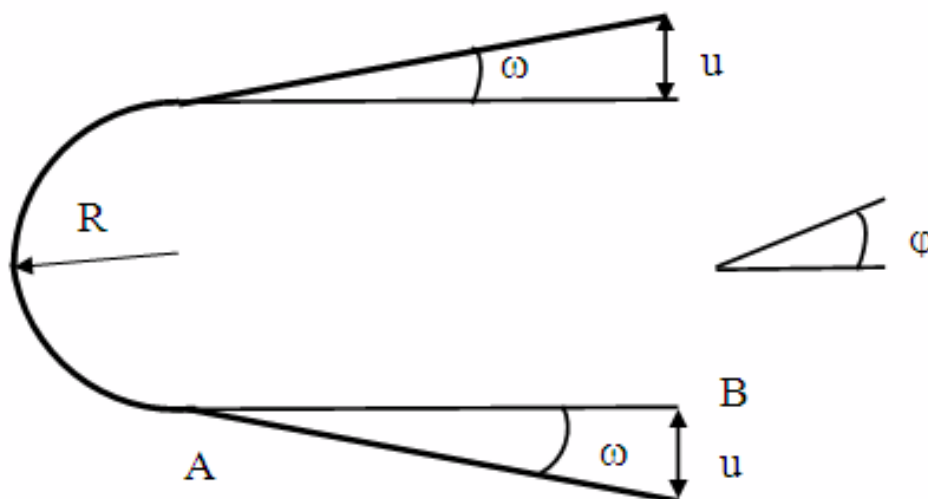


Рисунок 2 - Схема рассеяния радиоволн на исследуемой структуре с размерами  $R$ ,  $u$  и характерным углом  $\varphi$ .

Для уравнения Фредгольма первого рода, содержащего плотность неизвестного электрического тока при E-поляризации [12], можно записать следующее выражение:

$$\frac{\omega \cdot \mu}{4} \cdot \int_{\alpha}^{\beta} j(t) \cdot N_0^2[k \cdot L_0(\tau, t)] \cdot \sqrt{\xi'^2(t) + \eta'^2(t)} dt = E_z^0(\tau),$$

$$\alpha \leq \tau \leq \beta, \quad (2)$$

где  $L_0(\tau, t) = \sqrt{[\xi(\tau) - \xi(t)]^2 + [\eta(\tau) - \eta(t)]^2}$  – представляет собой расстояние между точкой наблюдения и точкой интегрирования,  $E_z^0(\tau)$  – обозначает продольную составляющую напряженности первичного электрического поля для точки, находящейся на контуре. Контур задан в параметрической форме:  $x = \xi(t)$ ,  $y = \eta(t)$ ,  $\alpha \leq t \leq \beta$ , а  $\xi'(t)$ ,  $\eta'(t)$  – представляют собой первые производные соответствующих функций,  $k = 2 \cdot \pi / \lambda$ ,  $\lambda$  – длина падающей электромагнитной волны.

Уравнение (2) решается на основе метода моментов мы находим продольные электрические токи, имеющие плотность

$$\vec{j} = \vec{z} \cdot j(t), \quad \alpha \leq t \leq \beta, \quad (3)$$

Двумерную ЭПР анализируемой структуры можно найти исходя из следующего выражения

$$\sigma(\varphi) = (60 \cdot \pi)^2 \cdot k \cdot |D(\varphi)|^2, \quad (4)$$

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

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

Среднюю ЭПР мы вычисляем, основываясь на следующем выражении

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=0}^N \sigma(\varphi_i)}{N + 1}, \quad (5)$$

где  $\sigma(\varphi_i)$  - величина ЭПР для угла наблюдения  $\varphi_i$ .

Сектор улов наблюдения  $\Delta\theta$  был разбит на 7 участков, каждый из которых был равен  $10^\circ$ . Были заданы критерии, определяющие, как должны быть распределены средние значения ЭПР для какого из участков угла наблюдения:  $\sigma_1 > \sigma_5 > \sigma_6 > \sigma_2 > \sigma_7 > \sigma_4 > \sigma_3$ .

Мы выбрали значение угла  $\varphi = 11^\circ$ . Задачу определения  $R$ ,  $u$ , которые дают требуемое разбиение среднюю ЭПР в заданных секторах углов наблюдения, мы решали следующим образом. Задается значение сектора углов наблюдения  $\Delta\varphi$ . Для разных значений  $R$  определяются значения  $u$ .

Функция  $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(R, u)$  является многоэкстремальной, в этой связи при проведении расчетов  $R$ ,  $u$  мы применяли метод сеток [13] с последовательным сужением области определяемых значений. Для каждого участка сетки мы применяли муравьиный алгоритм [14, 15].

В нем используется правило перехода:

Муравей, который находится в точке  $r$ , будет делать выбор следующей точки  $s$ , основываясь на следующих уравнениях:

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_k(r)} \{ [\tau(r, u)] [\eta(r, u)]^\beta \}, & q < q_0 \\ \text{выбор согласно} \\ \text{следующему} \\ \text{уравнению}, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (6)$$

здесь  $J_k(r)$  представляет собой то множество ячеек в сетке, которые требуется, чтобы муравей  $k$  посетил, он расположен в точке сетки  $r$ ,  $\tau(r, s)$

представляет собой меру феромона,  $\eta(r, u) = 1/\delta(r, u)$ , причем вес  $\delta(r, u)$  выбирается в виде расстояния между точками,  $q$  мы обозначаем случайную величину,  $q_0$  - это параметр ( $0 \leq q \leq 1, 0 \leq q_0 \leq 1$ ).

В том случае, когда  $q \geq q_0$ , муравей будет проводить выбор следующей точки в соответствии со следующим уравнением:

$$p_k(r, s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r, s)] \cdot [\eta(r, s)]^\beta}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(r, u)] \cdot [\eta(r, u)]^\beta}, & \text{если } s \in J_k(r) \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (7)$$

здесь  $p_k(r, s)$  обозначена вероятность того, что точка  $s$  будет выбрана муравьем  $k$ , который расположен в точке  $r$ .

Используется правило локального обновления:

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(r, s) + \rho \cdot \Delta\tau(r, s), \quad (8)$$

где  $\rho$  - локальный параметр,  $0 > \rho > 1$ ,  $\Delta\tau(r, s)$  представляет собой сумму феромона, который оставлен муравьями.

Есть соответствие глобального правила обновления и следующего уравнения:

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot \tau(r, s) + \alpha \cdot \Delta\tau(r, s), \quad (9)$$

где  $\alpha$  - глобальный параметр,  $0 > \alpha > 1$ ,  $\Delta\tau(r, s) = 1/(\text{лучшая глобальная длина})$ , в том случае, если есть принадлежность отрезка  $(r, s)$  к этой длине.

**Результаты.** На основе комбинированного алгоритма было проведено моделирование. Было установлено, что указанный критерий определяющий, как должны распределены средние значения ЭПР для какого из участков угла наблюдения будет выполняться для  $R=3.1\lambda$ ,  $R=4.7\lambda$ , где  $\lambda$  - длина падающей электромагнитной волны.

**Выводы.** В работе приведена структура подсистемы анализа дифракционных структур электродинамических объектов. Сектор углов наблюдения за уровнем характеристик рассеяния. был разбит на определенное число участков. На основе рассмотренного комбинированного подхода, включающего в себя метод интегральных уравнений и муравьиный алгоритм, была продемонстрирована возможность определения характерных размеров объекта, для которого установлен критерий определяющий, как должны быть распределены средние значения ЭПР для каждого из участков угла наблюдения. Рассмотренный подход может быть использован для широкого класса электродинамических объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Алимбеков А.Р. Методы определения рассеивающих свойств объектов / А.Р.Алимбеков, Е.А.Авдеенко, В.В.Шевелев // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2017. № 1(20). С. 22-24.
2. Толстых С.М. Analytical review of methods of information security in wireless networks / С.М.Толстых, А.Г.Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2017. № 1(20). С. 67-69.
3. Толстых С.М. Управление системами беспроводной связи / С.М.Толстых, А.Г.Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2017. № 2(21). С. 83-85.
4. Баутин И.А. Модели распространения радиосигнала wi-fi / И.А.Баутин, А.Г.Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2017. № 2(21). С. 107-112.
5. Ерасов С.В. Оптимизационные процессы в электродинамических задачах / С.В.Ерасов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 20-26.
6. Болучевская О.А. Свойства методов оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн / О.А.Болучевская, О.Н.Горбенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 3. С. 4.
7. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели / В. О. Кобак - М.: Сов. радио, 1972. -248 с.
8. Harrington R. F. Field Computation by Moment Method / R.F.Harrington // IEEE Press, New York, 1993.
9. Штагер Е. А. Рассеяние волн на телах сложной формы. / Е. А. Штагер, Е. Н. Чаевский // М.: Сов. радио, 1974. 240 с.
10. Васильев Е. Н. Возбуждение тел вращения / Е. Н. Васильев // М.: Радио и связь, 1987. 270 с.
11. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach. / H.Ling // IEEE Trans. Antennas Propagat., 1990, vol. AP-38, no. 9. - Pp. 1413-1420.
12. Захаров Е. В. Численные методы решения задач дифракции / Е. В. Захаров, Ю. В. Пименов. // М.: Радио и связь, 1986. - 184 с.
13. Львович Я.Е. Многоальтернативная оптимизация: теория и приложения / Я.Е.Львович // Воронеж, 2006, Издательство "Кварт", 415 с.
14. X Hu Orthogonal methods based ant colony search for solving continuous optimization problems / X Hu, J Zhang, and Y Li. //Journal of Computer Science and Technology, 2008, 23(1): pp.2-18.

15. Martens D. Classification with Ant Colony Optimization / D.Martens, De M.Backer, R.Haesen, J.Vanthienen, M.Snoeck, B.Baesens// IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(5): 651-665.
16. Yitzhaki S. On Using Linear Regression in Welfare Economics / S. Yitzhaki // Journal of Business & Economic Statistics, 1996, v.14, №4, October, 478-86.

A. P. Preobrazhensky

**THE SIMULATION OF RADIO WAVE SCATTERING ON OBJECTS  
WITH COMPLEX SHAPE BASED ON THE METHOD OF INTEGRAL  
EQUATIONS AND THE "ANT ALGORITHM"**

*Voronezh institute of high technologies, Voronezh, Russia*

*The modern electrodynamic objects included in the antenna systems are characterized by a complex structure and many parameters. This determines the use of appropriate methods allows the synthesis of such objects. This paper proposes the structure of the subsystem of the analysis of the diffraction structures of the antenna system. The analysis is based on two approaches. The first of them is based on the method of integral equations, with its use is the calculation of the scattering parameters. The integral equation is solved based on the method of moments. The second one is based on the combination of ant algorithm and grid method. For a possible range of values of the characteristic dimensions of the investigated object was used by grid method with successive narrowing of the field determined values. For each plot mesh, we used the ant algorithm. In the analysis of the characteristics of an object of complex shape, we represent it as a set of multiple reflectors, which do not interact. General characteristics of the scattering depend on the values of the scattering characteristics of each reflector, and the phase difference on incident electromagnetic waves. Carried out split sector angles for a number of sectors. Revealed the characteristic dimensions of the object for which the criterion specifies how should be distributed the average values of the scattering parameters for some of the sections of angle. The results can be useful for design of dynamic objects with the specified requirements in terms of the scattering parameters.*

**Keywords:** *electrodynamic structure optimization, the method of integral equations, the ant algorithm.*

**REFERENCES**

1. Boluchevskaya O.A. Svoystva metodov otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln / O.A.Boluchevskaya, O.N.Gorbenko // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2013. No.3. p. 4.
2. Kobak V. O. Radiolokatsionnye otrazhateli / V. O. Kobak - M.: Sov. radio, 1972. -248 p.
3. Harrington R. F. Field Computation by Moment Method / R.F.Harrington // IEEE Press, New York, 1993.
4. Shtager E. A. Rasseyanie voln na telakh slozhnoy formy. / E. A. Shtager, E. N. Chaevskiy // M.: Sov. radio, 1974. 240 p.



5. Vasil'ev E. N. Vozbuzhdenie tel vrashcheniya / E. N. Vasil'ev // M.: Radio i svyaz', 1987. 270 p.
6. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach. / H.Ling // IEEE Trans. Antennas Propagat., 1990, vol. AP-38, no. 9. - pp. 1413-1420.
7. Zakharov E. V. Chislennyye metody resheniya zadach difraktsii / E. V. Zakharov, Yu. V. Pimenov. // M.: Radio i svyaz', 1986. - 184 p.
8. L'vovich Ya.E. Mnogoal'ternativnaya optimizatsiya: teoriya i prilozheniya / Ya.E.L'vovich // Voronezh, 2006, Izdatel'stvo "Kvarta", 415 p.
9. X Hu Orthogonal methods based ant colony search for solving continuous optimization problems / X Hu, J Zhang, and Y Li. //Journal of Computer Science and Technology, 2008, 23(1): pp.2-18.
10. Martens D. Classification with Ant Colony Optimization / D.Martens, De M.Backer, R.Haesen, J.Vanthienen, M.Snoeck, B.Baesens// IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2007, 11(5): 651-665.
11. Yitzhaki S. On Using Linear Regression in Welfare Economics / S. Yitzhaki // Journal of Business & Economic Statistics, 1996, Vol.14, No.4, October, 478-86.