

УДК 621.396
EDN: QNFEOE

PACS: 84.40.-x

**Исследование математических моделей для оценок характеристик рассеяния полых структур***Т. В. Аветисян, Я. Е. Львович, А. П. Преображенский,
Ю. П. Преображенский*

На сегодняшний день одной из важных и актуальных задач науки электродинамики является исследование характеристик рассеяния различных электродинамических объектов со сложной формой. Среди них можно выделить полые структуры, которые входят в состав антенных систем и конструкций различных технических объектов. Их вклад в уровни электромагнитных полей в области передней полусферы может быть достаточно большим. Корректное решение характеристик рассеяния электромагнитных волн связано с использованием соответствующих математических методов. С одной стороны, они должны давать, по возможности, меньшую ошибку, с другой стороны размерность получающейся задачи должна быть такой, чтобы получить решение за относительно небольшое время. Исследованы характеристики рассеяния полых структур на основе метода интегральных уравнений. Проводится сравнение на основе методики тонкого экрана, дающее меньшее значение размерности задачи, и с учетом конечной толщины стенок. Определено значение толщины стенок, для которого возможно использование первого подхода. Представлены результаты проведенного моделирования.

Ключевые слова: численное моделирование, вычислительный эксперимент, дифракция электромагнитных волн, полая структура, интегральное уравнение, эффективная площадь рассеяния.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-10-14

Введение

На практике исследователям приходится изучать то, как происходит рассеяние электромагнитных волн (ЭМВ) для радиолокационного диапазона длин волн на разных полых структурах [1, 2]. Они есть в составе технических объектов. При этом рассматриваются или в виде элементов конструкций или как компоненты антенно-фидерных устройств [3]. Зада-

чи при расчете характеристик рассеяния могут быть связаны с управлением электромагнитной обстановкой, а также снижением радиолокационной заметности [4, 5]. Те полые структуры, у которых размеры лежат в резонансной области, рассматриваются как наиболее сложные с точки зрения исследований.

Чтобы проводить анализ и осуществлять проектирование разных дифракционных структур и антенных устройств на настоящий

¹ Аветисян Татьяна Владимировна¹, старший преподаватель.

Е-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru

Львович Яков Евсеевич², д.т.н., профессор.

Преображенский Андрей Петрович¹, д.т.н., профессор.

Преображенский Юрий Петрович¹, к.т.н., доцент.

¹ Воронежский институт высоких технологий.

Россия, 394043, г. Воронеж, ул. Ленина, 73 а.

² Воронежский государственный технический университет.

Россия, 34026, г. Воронеж, ул. Московский проспект, 14.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023

После доработки 22.01.2023

Принята к публикации 2.02.2023

© Аветисян Т. В., Львович Я. Е., Преображенский А. П., Преображенский Ю. П., 2023

момент существуют некоторые программные продукты [6–8]. Многие из них связаны преимущественным образом с тем, что решаются соответствующие специальные вопросы. Как ограничение их применения можно указать представление трехмерных дифракционных структур в виде наборов планарных элементов, которые размещены в разных слоях. Кроме того, трехмерное пространство, внутри которого размещаются объекты, будет разбиваться на достаточно большое число ячеек. Это обуславливает заметный рост времени проводимых расчетов. Универсальных подходов для расчета сложных электродинамических структур на настоящий момент не существует.

Таким образом, возникает проблема повышения эффективности проектирования дифракционных структур и радиолокационных антенн с возможностью реализации систем на персональных компьютерах.

Можно осуществлять моделирование рассеяния ЭМВ на полых структурах при помощи двух подходов. В первом эти структуры рассматриваются в виде компонентов волноводов. Можно в различной литературе познакомиться с разработанными на настоящий момент математическими методами, которые применяются для того, чтобы осуществлять расчет разных волноводов [3, 9, 10]. Во втором подходе полая структура рассматривается в виде тела со сложной формой. В таких случаях необходимо применять метод интегральных уравнений [11]. В ряде случаев он требует, чтобы привлекались достаточно большие ресурсы. Это связано со сложной формой полых структур. Тогда интегральное уравнение будет решаться при учете того, какие особенности в изменениях разных участков поверхностей или контуров. При этом в противоположность волноводным подходам есть возможности для того, чтобы вести анализ по электромагнитным полям, которые будут отражаться от внешних поверхностей полых структур.

Целью данной работы является исследование возможностей использования подходов, базирующихся на применении моделей бесконечно тонких экранов для оценок рассеяния полых металлических структур, имеющих конечную толщину стенок.

Модель расчета характеристик рассеяния ЭМВ на полой идеально проводящей структуре

На рис. 1 приведена модель двумерной полой структуры, которая рассматривается с учетом бесконечно малой толщины стенок.

При проведении расчетов характеристик рассеяния мы будем использовать двумерное интегральное уравнение Фредгольма первого рода. Если падающая электромагнитная волна будет иметь E -поляризацию [12], то уравнение записывается таким образом:

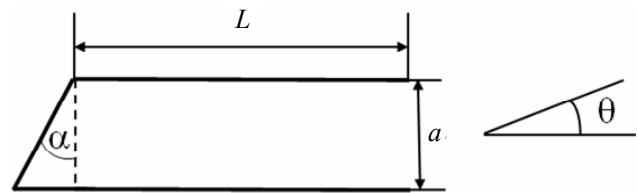


Рис. 1. Иллюстрация модели полой структуры, представленной в виде бесконечно тонкого экрана

$$\frac{\omega \cdot \mu}{4} \times \int_{\alpha}^{\beta} j(t) \cdot H_0^2 [k \cdot L_0(\tau, t)] \cdot \sqrt{\xi'^2(t) + \eta'^2(t)} dt = E_z^0(\tau), \quad \alpha \leq \tau \leq \beta, \quad (1)$$

в данном уравнении мы считаем, что $L_0(\tau, t) = \sqrt{[\xi(\tau) - \xi(t)]^2 + [\eta(\tau) - \eta(t)]^2}$ – показывает расстояние между центром наблюдения и центром интегрирования, $E_z^0(\tau)$ – рассматривается на контуре как продольная компонента напряженности для электрического поля. Для полой структуры используется параметрический способ, чтобы задавать контур: $x = \xi(t)$, $y = \eta(t)$, $\alpha \leq t \leq \beta$, а $\xi'(t)$, $\eta'(t)$ – соответствуют первым производными для анализируемых функций, $k = 2 \cdot \pi / \lambda$, λ – длина волны.

Для того, чтобы осуществить решение уравнения (1) применяется метод коллокаций. Тогда оно будет сведено к системе линейных алгебраических уравнений. После этого будут

определены продольные электрические токи относительно плотности

$$\vec{j} = \vec{z} \cdot j(t), \quad \alpha \leq t \leq \beta. \quad (2)$$

Для того, чтобы осуществить расчет двумерной эффективной площади рассеяния (ЭПР) полой структуры применяем выражение:

$$\sigma(\phi) = (60 \cdot \pi)^2 \times k \times |D(\phi)|^2, \quad (3)$$

здесь

$$D(\phi) = \int_{\alpha}^{\beta} j(t) \times \sqrt{\xi^2(t) + \eta^2(t)} \times \exp(i \times k \times d(t, \phi)) dt,$$

$$d(t, \phi) = \xi(t) \times \cos(\phi) + \eta(t) \times \sin(\phi).$$

На рис. 2 показана модель двумерной полой структуры, которая требует использования метода интегральных уравнений при учете конечной толщины стенок.

То есть, при использовании интегрального уравнения (1) контур интегрирования проходит таким образом, что он учитывает отражение от внешней и внутренней поверхности полой структура, а также конечную толщину стенок, отражение от краев апертуры. Решение уравнения (1) проводилось на основе метода коллокаций [3, 11, 12].

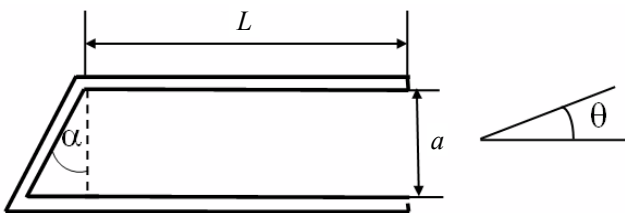


Рис. 2. Иллюстрация модели полой структуры, с учетом в ней конечной толщины стенок

Результаты

В том вычислительном эксперименте, который был проведен, осуществлялось исследование приведенных выше моделей. Были рассмотрены полые структуры, у которых размеры апертуры и длин лежали в пределах резонансной области $1\lambda \leq a, L \leq 10\lambda$. На основе уравнения (1) осуществлялся расчет ЭПР на основе модели, приведенной на рис. 1 и на основе модели, которая указана на рис. 2.

На рис. 3 приведены сравнительные результаты, которые соответствуют размерам $a = 6\lambda, L = 7\lambda, \alpha = 0^\circ$. Кривая 1 соответствует расчету модели на рис. 1, кривая 2 – расчету модели на рис. 2 при толщине стенки $d = 0,1\lambda$, кривая 3 – расчету модели на рис. 2 при толщине стенки $d = 0,15\lambda$, кривая 4 – расчету модели на рис. 2 при толщине стенки $d = 0,2\lambda$, кривая 5 – расчету на основе модального метода, кривая 6 – расчету на основе метода краевых волн. На рис. 4 приведены сравнительные результаты, которые соответствуют размерам $a = 5\lambda, L = 5\lambda, \alpha = 20^\circ$.

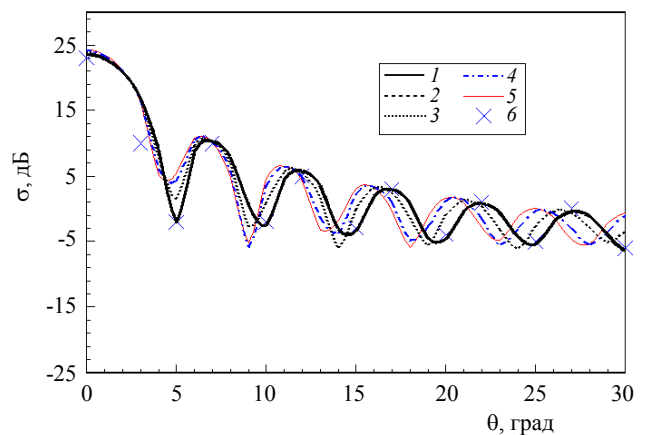


Рис. 3. Зависимости эффективной площади рассеяния от угла наблюдения при $\alpha = 0^\circ$.

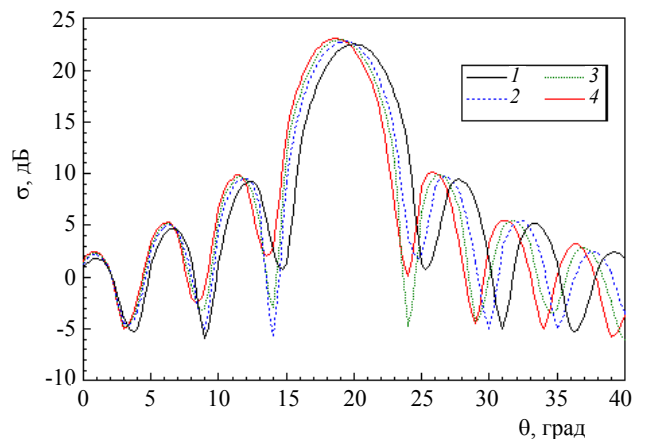


Рис. 4. Зависимости эффективной площади рассеяния от угла наблюдения при $\alpha = 20^\circ$

Кривая 1 соответствует расчету модели на рис. 1, кривая 2 – расчету модели на рис. 2 при толщине стенки $d = 0,1\lambda$, кривая 3 – расчету модели на рис. 2 при толщине стенки $d = 0,15\lambda$, кривая 4 – расчету модели на рис. 2 при толщине стенки $d = 0,2\lambda$. Видно совпадение результатов на основе всех подходов в об-

ласти диаграммы обратного рассеяния. По мере увеличения угла наблюдения θ в побочных максимумах диаграммы обратного рассеяния наблюдается сдвиг. Он становится все больше, чем больше будет учитываемая толщина стенок полой структуры. Также будет нарастать различие в минимумах диаграммы обратного рассеяния по мере увеличения толщины стенок. Метод краевых волн [13, 14] позволяет учесть отражение от краев структуры. Но на его основе нет возможностей для учета значительной толщины стенки.

Анализ показал, что если допускать различие в результатах, полученных на основе двух указанных моделей полых структур порядка 1–2 дБ (что может соответствовать экспериментальной погрешности), подход, базирующийся на использовании представления описания на основе тонкого экрана, может быть применен для толщин полой структуры, не превышающих $0,15\lambda$.

При этом результаты ЭПР могут быть использованы в пределах основного и двух побочных максимумов диаграммы обратного рассеяния.

Заключение

В данной работе, авторами был проведен численный эксперимент по исследованию возможностей применения упрощенной модели тонкого экрана для определения характеристик рассеяния полых структур. Такой подход в рамках определенных ограничений по углам наблюдения позволяет заметным обра-

зом снизить размерность при численном решении задачи с учетом небольшой толщины стенок полой структуры, входящей в состав различных технических объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бочкарев А. В., Долгов А. Н. / Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 2.
2. Стайнберг Б. Д., Карлсон Д. Л., Ву Сэн Ли / ТИИЭР. 1989. № 5. С. 35–42.
3. Преображенский А. П. Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн. – Воронеж: Научная книга, 2007.
4. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1972.
5. Preobrazhenskiy A. P. / Telecommunications and Radio Engineering. 2007. Vol. 66. № 17. С. 1543–1548.
6. Разевиг В. Д., Потапов Ю. В., Курушин А. А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003.
7. Банков С. Е., Курушин А. А., Разевиг В. Д. Анализ и оптимизация трехмерных СВЧ структур с помощью HFSS. – М.: Солон-Пресс, 2005.
8. Курушин А., Мюхкержа И., Подковырин С. / Электроника: Наука, технология, бизнес. 2016. № 7(157). С. 98–103.
9. Ling H. / IEEE Trans. Antennas Propagat. 1990. Vol. AP-38. № 9. P. 1413–1420.
10. Ling H. / IEEE Trans. Antennas Propagat. 1989. Vol. AP-37. № 5. P. 648–654.
11. Галишишникова Т. Н., Ильинский А. С. Численные методы в задачах дифракции. – М.: МГУ, 1987.
12. Захаров Е. В., Пименов Ю. В. Численные методы решения задач дифракции. – М.: Радио и связь, 1986.
13. Уфимцев П. Я. Метод краевых волн физической теории дифракции. – М.: Сов. радио, 1962.
14. Preobrazhenskiy A. P. / Telecommunications and Radio Engineering. 2005. Vol. 63. № 3. P. 269–274.

PACS: 84.40.-x

Investigation of mathematical models for estimating the scattering characteristics of hollow structures

T. V. Avetisyan¹, Ya. E. Lvovich², A. P. Preobrazhenskiy¹ and Yu. P. Preobrazhenskiy¹

¹ Voronezh Institute of High Technologies
73a Lenina st., Voronezh, 394043, Russia

² Voronezh State Technical University
14 Moscow district, Voronezh, 394026, Russia

Received 10.01.2023; revised 22.01.2023; accepted 2.02.2023

Today, one of the important and urgent tasks of the aerodynamics science is the study and optimization of aerodynamic characteristics of optimized profile shapes in a gas flow. This problem arises in the design of aircraft and various vessels and is associated with a rational choice of profile shape for a large number of different characteristics and, in particular, in terms of aerodynamic drag.

In this paper, consider methods for optimizing an axisymmetric aerodynamic profile in a stationary laminar inviscid gas flow at different angles of attack. The proposed method of solving such a problem of optimization and numerical study of aerodynamic characteristics of the described body in the flow is relevant due to the complexity of its solution, for example, by traditional methods based on the Navier-Stokes system of differential equations. Experimental methods are based on expensive and time-consuming tools that do not guarantee finding the optimum. Such a computing tool as Ansys Fluent is well suited for solving such problems of hydroaerodynamics and allows not only to speed up and reduce the cost of the computational experiment, but also to increase the efficiency of its implementation.

The article describes the process of finding the optimum, which reduces to minimizing the drag force of the previously described axisymmetric profile. A description is also given of the wing profile geometry parameterization and its analysis through the proposed software package.

The result of the numerical study is the obtained description of the aerodynamic characteristics of the optimized profile shape for various gas flow rates.

Keywords: Numerical simulation, computational experiment, aeronautical engineering, Ansys Fluent software system, airfoil, optimization process, drag minimization.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-2-10-14

REFERENCES

1. Bochkarev A. V. and Dolgov A. N., Zarubezhnaya radioelektronika, № 2 (1989) [in Russian].
2. Steinberg B. D., Carlson D. L. and Vu Sen Li, TIIEER, № 5, 35–42 (1989) [in Russian].
3. Preobrazhenskiy A. P., Modelirovanie i algoritimizatsiya analiza difraktsionnykh struktur v SAPR radiolokatsionnykh antenn, Voronezh, Scientific book, 2007 [in Russian].
4. Kobak V. O., Radiolocation reflectors, Moscow, Soviet Radio, 1972 [in Russian].
5. Preobrazhenskiy A. P., Telecommunications and Radio Engineering **66** (17), 1543–1548 (2007).
6. Razevig V. D., Potapov Yu. V. and Kurushin A. A., Microwave Device Design with Microwave Office, Moscow, Solon-Press, 2003 [in Russian].
7. Bankov S. E., Kurushin A. A. and Razevig V. D., Analysis and optimization of the three-dimensional microwave structures by means of HFSS, Moscow, Solon-Press, 2005 [in Russian].
8. Kurushin A., Mukheria I. and Podkovyrin S., Electronics: Science, technology, business, № 7(157), 98–103 (2016) [in Russian].
9. Ling H., IEEE Trans. Antennas Propagat. **AP-38** (9), 1413–1420 (1990) [in Russian].
10. Ling H., IEEE Trans. Antennas Propagat. **AP-37** (5), 648–654 (1989) [in Russian].
11. Galishnikova T. N. and Ilyinsky A. S., Numerical methods in diffraction problems, Moscow State University, 1987.
12. Zakharov E. V. and Pimenov Yu. V., Numerical methods for solving problems of diffraction, Moscow, Radio and Communications, 1986 [in Russian].
13. Ufimtsev P. Ya. Method of boundary waves in physical theory of diffraction, Moscow, Soviet Radio, 1962 [in Russian].
14. Preobrazhenskiy A. P., Telecommunications and Radio Engineering **63** (3), 269–274 (2005).