

УДК 53.097:621.396.6

DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_2\\_55\\_7](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_7)  
EDN: CQTDWZ

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ПОЛЫХ СТРУКТУР

Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский

*Воронежский институт высоких технологий*

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MODELS FOR ESTIMATION OF HOLLOW STRUCTURES SCATTERING CHARACTERISTICS

T.V. Avetisyan, J.E. Lvovich, A.P. Preobrazhensky

*Voronezh Institute of High Technologies*

**Аннотация.** Проведено исследование возможности использования модели полой структуры с простой формой для оценки характеристик рассеяния полой структуры со сложной формой. Даны примеры, в которых осуществляется расчет характеристик рассеяния, если происходит падение плоской электромагнитной волны.

**Ключевые слова:** метод интегральных уравнений, рассеяние радиоволн, моделирование.

**Для цитирования:** Аветисян, Т.В. Сравнительный анализ моделей оценки характеристик рассеяния полых структур / Т.В. Аветисян, Я.Е. Львович, А.П. Преображенский // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 2 (55). – С. 7–10. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_2\\_55\\_7](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_7). – EDN: CQTDWZ

**Abstract.** The possibility of using a model of a hollow structure with a simple shape to estimate the scattering characteristics of a hollow structure with a complex shape was investigated. The examples are given in which the scattering characteristics are calculated if a plane electromagnetic wave is incident.

**Keywords:** integral equation method, radio wave scattering, modeling.

**For citation:** Avetisyan, T.V. Comparative analysis of models for estimation of hollow structures scattering characteristics / T.V. Avetisyan, J.E. Lvovich, A.P. Preobrazhensky // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 2 (55). – P. 7–10. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2023\\_2\\_55\\_7](https://doi.org/10.54341/20778708_2023_2_55_7) (in Russian). – EDN: CQTDWZ

### Введение

Расчет радиолокационных характеристик объектов является весьма актуальным в настоящее время, данными вопросами занимались различные исследователи [1]–[3]. Полые структуры могут быть в структуре разных технических объектов. Летательные аппараты имеют в своем составе выходные сопла двигателей, а также воздухозаборники. Их размеры существенны по сравнению с длинами электромагнитных волн. Значения мощности рассеянных электромагнитных волн могут быть достаточно значительными. От всей мощности излучения в передней полусфере они могут составлять десятки процентов [2]. Полые структуры могут быть выделены также в составе антенно-фидерных устройств, например в рупорных и волноводных антеннах [3], [4].

Механизмы рассеяния электромагнитных волн на полых структурах являются достаточно сложными. Это связано с тем, что могут быть выделены несколько областей в таких структурах – внутренняя, внешняя, теневая. Изучение отмеченных механизмов позволит, если необходимо, обеспечить уменьшение вторичного электромагнитного излучения. Это относится также к

проблемам уменьшения радиолокационной заметности, достижения необходимых уровней эффективной площади рассеяния (ЭПР) и т. д. [4].

Реализация экспериментальных исследований не всегда является возможной. В этой связи повышается роль теоретических разработок, применения методов математического моделирования при рассмотрении процессов рассеяния радиоволн на полых структурах.

Целью работы является исследование возможностей использования модели полой структуры с простой формой для оценок характеристик рассеяния полых структур, в которых форма более сложная.

### 1 Описание моделей

В литературе можно встретить описание различных методов при описании характеристик полых структур. Но на практике полые структуры могут иметь отличия от идеальных форм. Например, в полой структуре, которая рассматривается в двумерном представлении, может быть небольшой наклон в боковых стенках. Степень наклона определяется углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ . Представляет интерес для оценок характеристик такой

полой структуры использовать модель, которая приведена на рисунок 1.1. В ней боковые стенки будут параллельными.

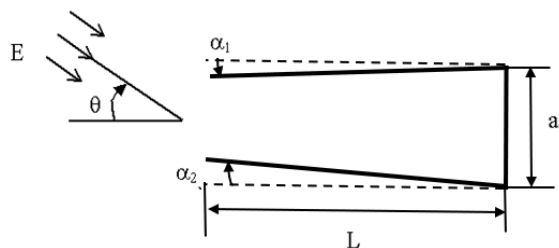


Рисунок 1.1 – Иллюстрация того, как рассеиваются электромагнитные волны на полости со сложной формой, отмечены углы  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  к перпендикуляру к задней стенке. Задняя стенка имеет размер  $a$ , длина полой структуры  $L$

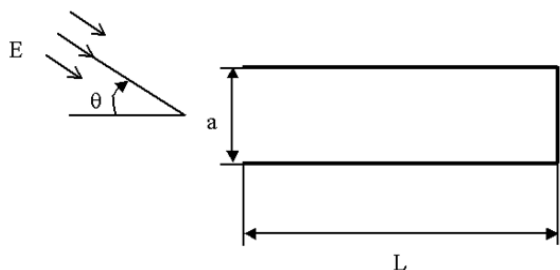


Рисунок 1.2 – Иллюстрация того, как происходит рассеяние электромагнитных волн на полой структуре, имеющей простую форму

Падение электромагнитной волны происходит под углом  $\theta$ .

Требуется провести оценку диапазона углов, в котором может быть использована вторая модель (рисунок 1.2) для оценки характеристик рассеяния первой модели (рисунок 1.1). Углы отсчитываются от нормали к апертуре полой структуры. Необходимо, чтобы для двух моделей различие в ЭПР не превышало 3 дБ.

## 2 Методы расчета характеристик рассеяния полых структур

Для того, чтобы осуществить расчеты для характеристик рассеяния полой структуры, которая приведена на рисунке 1.1, мы опирались на метод интегральных уравнений [5]. Это связано с тем, что падающая электромагнитная волна ( $E$ -поляризация) будет возбуждать на контуре токи, которые будут распределены существенно неоднородным образом.

Выделяется произвольная точка наблюдения  $(x_0, y_0)$ . Для нее будет происходить сопоставление электрического поля  $E(x_0, y_0)$ . Эта точка может рассматриваться на металлическом контуре  $L_m$  (рисунок 1.1)). Формируется система интегральных уравнений Фредгольма 1 рода (1). Для того, чтобы ее записать, применяются соответствующие граничные условия [3], [5]:

$$E_0(x_0, y_0) + \int_{L_m} j_1(\tau) G_1(\rho) h(\tau) d\tau = 0, \quad (x_0, y_0) \in L_m;$$

$$\int_{L_m} j_2(\tau) G_2(\rho) h(\tau) d\tau = 0, \quad (x_0, y_0) \in L_m. \quad (2.1)$$

Интегрирование проводится по контуру  $L_m$ . Если рассматривается внешняя сторона такого контура, то ей будет соответствовать плотность потенциалов  $j_1$ . Если рассматривается внутренняя сторона такого контура, то ей будет соответствовать плотность потенциалов  $j_2$ . Падающая волна является плоской

$$E_0(x_0, y_0) = \exp(x_0 \cos(q) + y_0 \sin(q)).$$

Это мы рассматриваем, как соответствующий случаю, в котором наблюдение осуществляется в дальней зоне. Ведется наблюдение для моноэлектрического случая под углом  $\theta$  (рисунок 1.1). Отметим, что использование рассматриваемого подхода может быть расширено и на бистатистический случай рассеяния. В рассматриваемой системе уравнений применялись две двумерные функции Грина. Первая из них  $G_1(\rho)$  соответствует бесконечной области, в которой есть волновое число  $k = 2\pi / \lambda$ . В ходе расчетов мы учитывали, что  $\lambda$  соответствует длине волны, которая будет распространяться внутри свободного пространства. Вторая функция Грина  $G_2(\rho)$  соответствует бесконечной области, в которой есть волновое число  $k = (2\pi / \lambda) \sqrt{\epsilon\mu}$ . В аргументе функции Грина рассматривается  $\rho = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$ , что соответствует расстоянию, которое будет между точкой наблюдения и истока. При анализе контура интегрирования применяется коэффициент Ламе  $h$ .

Решение уравнения (2.1) проводилось на основе метода коллокаций. В качестве базисных функций рассматривались кусочно-постоянные функции, в качестве пробных функций –  $\delta$ -функции Дирака. В образующейся матрице системы линейных уравнений число обусловленности не превышало  $10^3$ .

Для того, чтобы определить поле, которое будет рассеиваться от анализируемых полых структур после того, как найден ток  $J$ , необходимо применять формулу [5], [6]:

$$E(\theta, R) = -\frac{i}{4} \sqrt{\frac{2}{\pi k_1 R}} \exp[-i(k_1 R - \pi/4)] \times$$

$$\times \int_{L_m} J(\tau) \exp[ik_1(x(\tau) \cos \theta + y(\tau) \sin \theta)] h(\tau) d\tau. \quad (2.2)$$

Чтобы определить для полости с более простой формой (рисунок 1.2) характеристики рассеяния, можно опираться на модальный метод.

Преимущество его заключается в том, что по сравнению с методом интегральных уравнений затрачивается значительно меньше времени. Особенно это становится заметно, когда полая структура имеет достаточно большую длину.

Отметим основные этапы при использовании модального метода [7], [8]:

1. Проводится решение электродинамической задачи на апертуре полой структуры. Происходит сшивание мод плоского волновода и тангенциальных компонент электрического и магнитного полей на апертуре. Для входящих мод происходит определение модальных коэффициентов для входящих мод.

2. С применением матрицы рассеяния ведется определение характеристик выходящих из полости мод [7].

3. Для того, чтобы найти рассеянные поля, необходимо применять приближение Стрэттона-Чу [7], [8]. Учитывается отражение только от внутренней области полой структуры, но не от ее краев и внешней поверхности.

4. Чтобы учесть отражение от краев, могут быть применены дополнительные поправочные коэффициенты, а также метод физической оптики [9], [10].

Существует возможность без ухудшения точности вычислений уменьшить число учитываемых в расчете мод. То есть для тех мод, по

которым соответствующие модальные лучи будут близки по направлению к перпендикуляру к задней стенке, наблюдается наибольший вклад в отраженную мощность [9].

Решение двумерной задачи в дальнейшем может быть применено для того, чтобы решать трехмерную задачу. То есть, Трехмерная ЭПР полой структуры  $\sigma_{трех}$  определяется на основе ЭПР двумерной полой структуры  $\sigma_{двум}$  [7]:

$$\sigma_{трех} = \frac{2b^2}{\lambda} \sigma_{двум}, \quad (2.3)$$

здесь учитывается размер  $b$ , который направлен перпендикулярно к плоскости, приведенной на рисунок 1.2 схемы полой структуры.

Таким образом, существуют возможности для оценок характеристик рассеяния полых структур на базе указанных выше подходов.

При рассмотрении модели полой структуры, которая дана на рисунке 1.1, мы предлагаем использовать величину  $\alpha = \max(\alpha_1, \alpha_2)$ . На рисунке 2.1 показано, каким образом идут линии уровня по диапазонам углов наблюдения  $\Delta\theta$ , внутри

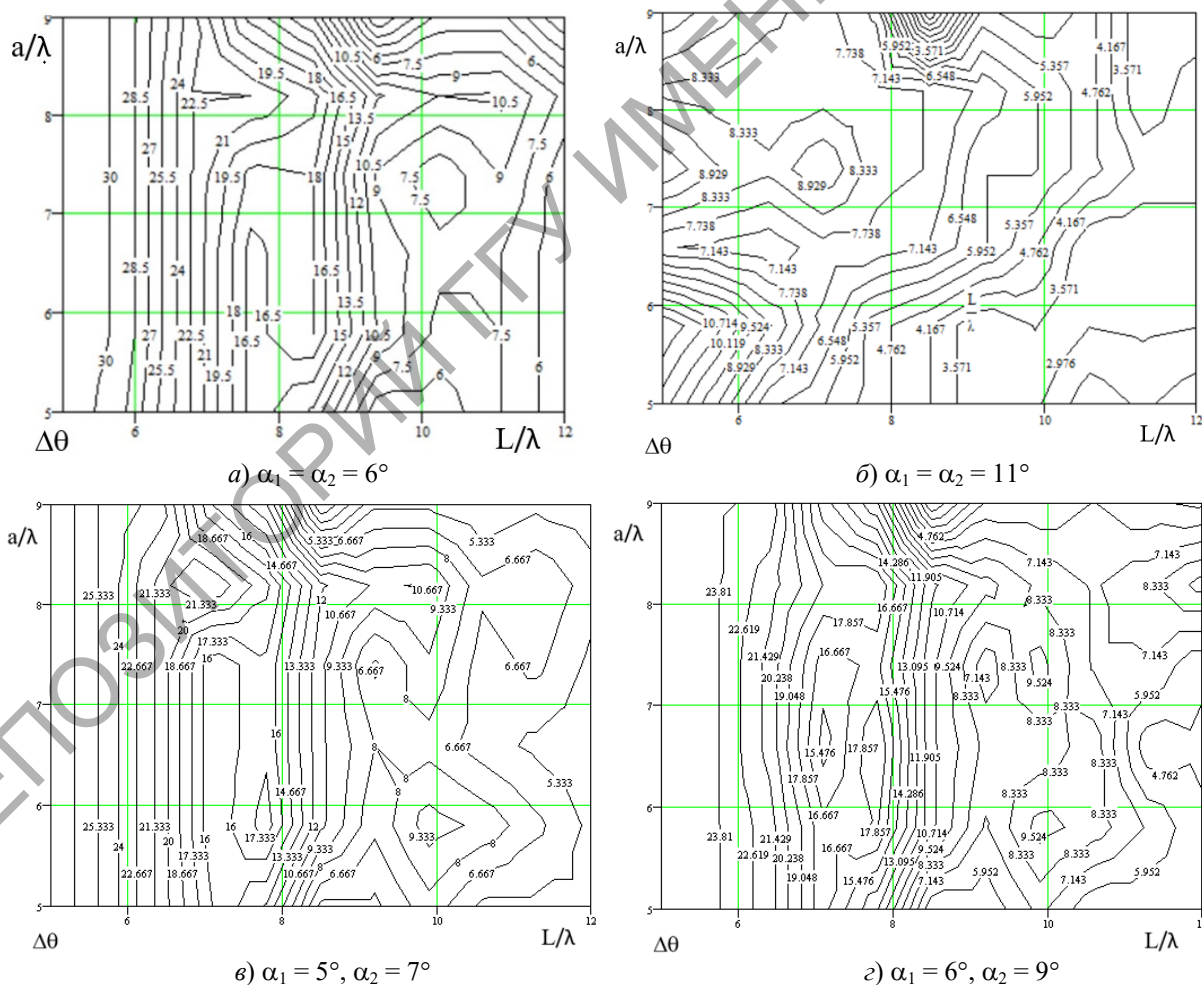


Рисунок 2.1 – Иллюстрация результатов оценок диапазонов углов  $\Delta\theta$ , внутри которых существуют возможности для того, чтобы представлять исходную полую структуру (рисунок 1.1) на базе приближенной модели (рисунок 1.2)

которых может быть использована модель, указанная на рисунке 1.1. Учитываются разные значения  $a$  и  $L$ . Приведено несколько зависимостей при различных значениях  $\alpha$ .

Анализ показывает, что происходит уменьшение диапазона углов  $\Delta\theta$  по мере роста значений  $\alpha$ . Кроме того, видно, что изменение значений  $\alpha$  будет оказывать меньшее влияние на  $\Delta\theta$ , чем когда будет происходить изменение в значениях длины полой структуры  $L$ .

Если значение  $\alpha$  небольшое, то диапазон углов  $\Delta\theta$  может составлять десятки градусов. Это демонстрирует эффективность предлагаемого нами подхода с использованием модели полости с более простой формой.

Дополнительным преимуществом этого подхода является возможность применения двумерной модели для решения трехмерных задач, если анализируются полые структуры с прямоугольным поперечным сечением.

Предлагаемая методика может быть использована для диапазона углов  $0^\circ \leq \alpha_1, \alpha_2 \leq 15^\circ$ .

#### Заключение

В работе даны предложения по использованию модели полой структуры с простой формой при оценках характеристик рассеяния полых структур со сложной формой. Осуществлены оценки возможности применения таких моделей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Vinogradova, E.D.* Rigorous Approach to Analysis of Backscattering from 2D Open-Ended S-shaped Cavities / E.D. Vinogradova, P.D. Smith // Microwave Mediterranean Symposium. – 2022. – P. 1–4.
2. *Bozorgi, M.* A generalized method for scattering from wide cavities with specified wave functions / M. Bozorgi // Microw Antennas Propag. – 2021. – Vol. 15. – P. 69–79.

3. *Electromagnetic scattering from a cavity embedded in an impedance ground plane* / K. Du, B. Li, W. Sun, H. Yang // Math. Methods Appl. Sci. – 2018. – № 23.

4. *Преображенский, А.П.* Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн / А.П. Преображенский. – Воронеж, 2007. – 248 с.

5. *Захаров, Е.В.* Численный анализ дифракции радиоволн / Е.В. Захаров, Ю.В. Пименов. – Москва: Наука, 1986. – 184 с.

6. *Preobrazhenskiy, A.P.* Estimation of possibilities of combined procedure for calculation of scattering cross section of two-dimensional perfectly conductive cavities / A.P. Preobrazhenskiy // Telecommunications and Radio Engineering. – 2005. – Т. 63, № 3. – С. 269–274.

7. *Ling, H.* RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach / H. Ling // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1990. – Vol. AP-38, № 9. – P. 1413–1420.

8. *Ling, H.* High-frequency RCS of open cavities with rectangular and circular cross sections / H. Ling, S.W. Lee, R.C. Chou // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1989. – Vol. AP-37, № 5. – P. 648–654.

9. *Altintas, A.* A selective modal scheme for the analysis of EM coupling into or radiation from large open-ended waveguides / A. Altintas, P.H. Pathak, M.C. Liang // IEEE Trans. Antennas Propagat. – 1988. – Vol. AP-36, № 1. – P. 84–96.

10. *Уфимцев, П.Я.* Метод краевых волн физической теории дифракции / П.Я. Уфимцев. – Москва: Советское радио, 1962. – 244 с.

Поступила в редакцию 20.01.2023.

#### Информация об авторах

*Аветисян Татьяна Владимировна* – специалист проектного отдела  
*Львович Яков Евсеевич* – д.т.н., профессор  
*Преображенский Андрей Петрович* – д.т.н., профессор