

Kutishchev Stanislav Nikolaevich,Doctor of Phys.-Math. Sciences, Professor, Department of Physics,
Voronezh State Technical University,**Nikishina Anna Igorevna,**Ph.D., Associate Professor, Department of Physics,
Voronezh State Technical University,

Кутищев Станислав Николаевич,

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики,
Воронежский государственный технический университет

Никишина Анна Игоревна,

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики,
Воронежский государственный технический университет

Abstract. *The formulation, results of the numerical solution, analysis of stability of the process of convergence of the solution of an inverse incorrect non-linear radiolocation problem are represented. The result of the solution of the considered problem was reconstruction of the number, amplitudes, coordinates of the local scattering sources of a two-dimensional metal cavity of rectangular shape from the backscattering pattern. The results of the numerical solution of the problem for the perfectly conducting two-dimensional rectangular cavity in the case of E-polarization of an incident plane monochromatic electromagnetic wave are presented. The limitations and possibilities of further researches in the considered direction are specified.*

Keywords: *incorrect inverse problem, backscattering pattern, local sources of scattering, stability of the convergence process of the numerical solution, procedure of optimal selective matching, electromagnetic wave, method, rectangular shaped cavity.*

Аннотация. *Представлены постановка, результаты численного решения, анализ устойчивости процесса сходимости решения обратной некорректной нелинейной радиолокационной задачи. Результатом решения рассмотренной задачи являлось восстановление количества, амплитуд, координат локальных источников рассеяния двумерной металлической полости прямоугольной формы по диаграмме обратного рассеяния. Представлены результаты численного решения задачи для идеально проводящей двумерной полости прямоугольной формы в случае E-поляризации падающей плоской монохроматической электромагнитной волны. Указаны ограничения и возможности дальнейших исследований в рассмотренном направлении.*

Ключевые слова: *некорректная обратная задача, диаграмма обратного рассеяния, локальные источники рассеяния, устойчивость процесса сходимости численного решения, процедура оптимального избирательного шивания, электромагнитная волна, метод, полость прямоугольной формы.*

ВВЕДЕНИЕ

В рамках работ по созданию объектов техники со сниженной радиолокационной заметностью [1] актуальным является решение проблемы нахождения информации о пространственной структуре локальных источников (ЛИ) [2] рассеяния на поверхности двумерной металлической полости прямоугольной формы (Рис. 1) [3]. Эта радиолокационная задача относится к классу обратных некорректных электродинамических задач [4]. Отметим, что такие полости могут рассматриваться, например, в качестве моделей воздухозаборников современных самолетов [2].

В работе [5] отмечалось, что эту радиолокационную задачу обычно решают на ЭВМ оптическими методами и методами, дающими решение в резонансной области. Решение рассматриваемой задачи в этих областях сопряжено с необходимостью разработки мер по повышению устойчивости процесса сходимости её численного решения. Так в работе [6] для случая E-поляризации падающей плоской

монохроматической волны была предложена процедура оптимального избирательного сшивания тангенциальных составляющих напряженности электрического поля на границах регулярных и нерегулярных волноводных областей.

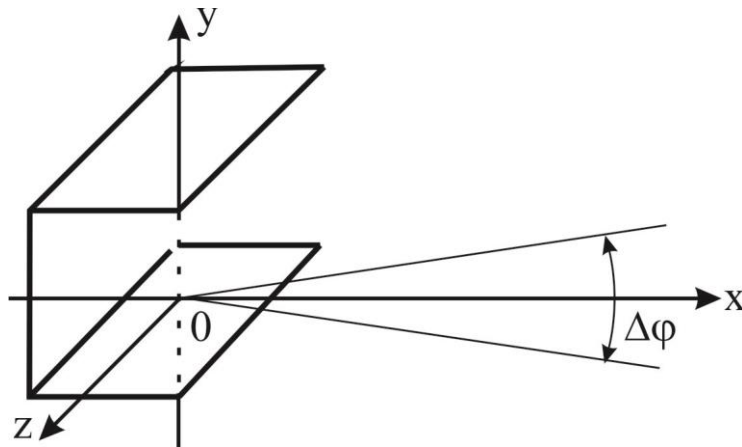


Рисунок 1. Геометрия полости прямоугольной формы

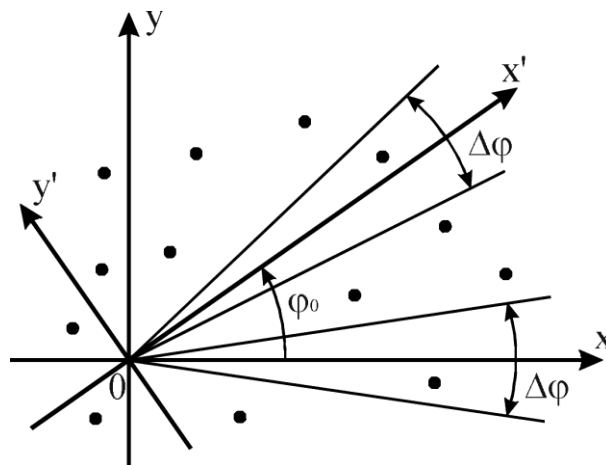


Рисунок 2. Модель объекта

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим случай моностатического рассеяния плоской электромагнитной волны системой N изотропных жестко связанных электродинамически независимых ЛИ (рис. 2), представляющей собой электродинамическую модель [7] объекта. При приеме узкополосного ($\Delta f/f \ll 1$, где f – несущая частота) отраженного сигнала в дальней зоне объекта и приемо-передающей антенны диаграмму обратного рассеяния (ДОР) с учетом результатов работы [1] и геометрии задачи (считая, что измерения проводятся в плоскости xy) можно представить следующим образом:

$$E^{(0)}(\varphi) = \sum_{i=1}^N E_i \exp(j2k(x_i \cos \varphi + y_i \sin \varphi)),$$

(1)

где x_m, y_m – координаты m -го отражателя; E_m – амплитуда сигнала, рассеянного m -м отражателем; φ – угол наблюдения, отсчитываемый от оси x , направленной вдоль биссектрисы сектора углов $\Delta\varphi$; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число; λ – длина волны. Формула (1) справедлива для любых углов наблюдения φ .

Когда $\Delta\varphi/2 \ll 1$ выражение (1) может быть линеаризовано и преобразовано к следующему виду:

$$E^{(0)}(u) = \sum_{i=1}^N \tilde{E}_i \exp(j2y_i u), \quad |u| \leq k \sin(\Delta\varphi/2) \ll k, \quad (2)$$

где $\tilde{E}_i = E_i \exp(j2kx_i)$, $u = k \sin(\varphi)$ – пространственная частота.

Таким образом, решаемую задачу можно сформулировать в виде: для рассматриваемой модели объекта необходимо найти количество ЛИ N , их амплитуды E_i , поперечные координаты y_i и продольные координаты x_i по известной из эксперимента (или решения прямой электродинамической задачи) ДОР $E^{(0)}(u)$, где $|u| \leq k \sin(\Delta\varphi/2) \ll k$.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Метод численного решения рассматриваемой задачи состоит из следующих этапов [3, 8].

Этап 1. По фрагменту $E^{(0)}(\varphi)$, известному на $|\varphi| \leq \Delta\varphi/2 \ll 1$, находятся количество ЛИ N , их поперечные координаты y_i и амплитуды E_i .

Этап 2. По фрагменту $E^{(0)}(\varphi)$, известному при $|\varphi - \varphi_0| \leq \Delta\varphi/2 \ll 1$, с помощью алгоритма этапа 1 находятся поперечные координаты y'_i ЛИ в системе координат $x'y'$, повернутой на угол φ_0 относительно системы координат $xу$ (рис. 2).

Продольные координаты ЛИ, располагаемых на поверхности полости, рассчитываются по формулам [3] на

а) верхней стенке полости:

$$x_i = -\frac{y'_i}{\sin \varphi_0} + 5\lambda \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad -10\lambda \leq x_i \leq 0; \quad (3)$$

$$y_i = 5\lambda;$$

б) нижней стенке полости:

$$x_i = -\frac{y'_i}{\sin \varphi_0} - 5\lambda \operatorname{ctg} \varphi_0, \quad -10\lambda \leq x_i \leq 0; \quad (4)$$

$$y_i = -5\lambda;$$

в) задней стенке полости:

$$x_i = -10\lambda;$$

(5)

$$y_i = \frac{y'_i}{\cos \varphi_0} - 10\lambda \operatorname{tg} \varphi_0, -5\lambda \leq y_i \leq 5\lambda.$$

Представим результаты решения рассматриваемой задачи для металлической полости прямоугольной формы с размером апертуры 10λ и длиной 10λ (рис. 1) [3].

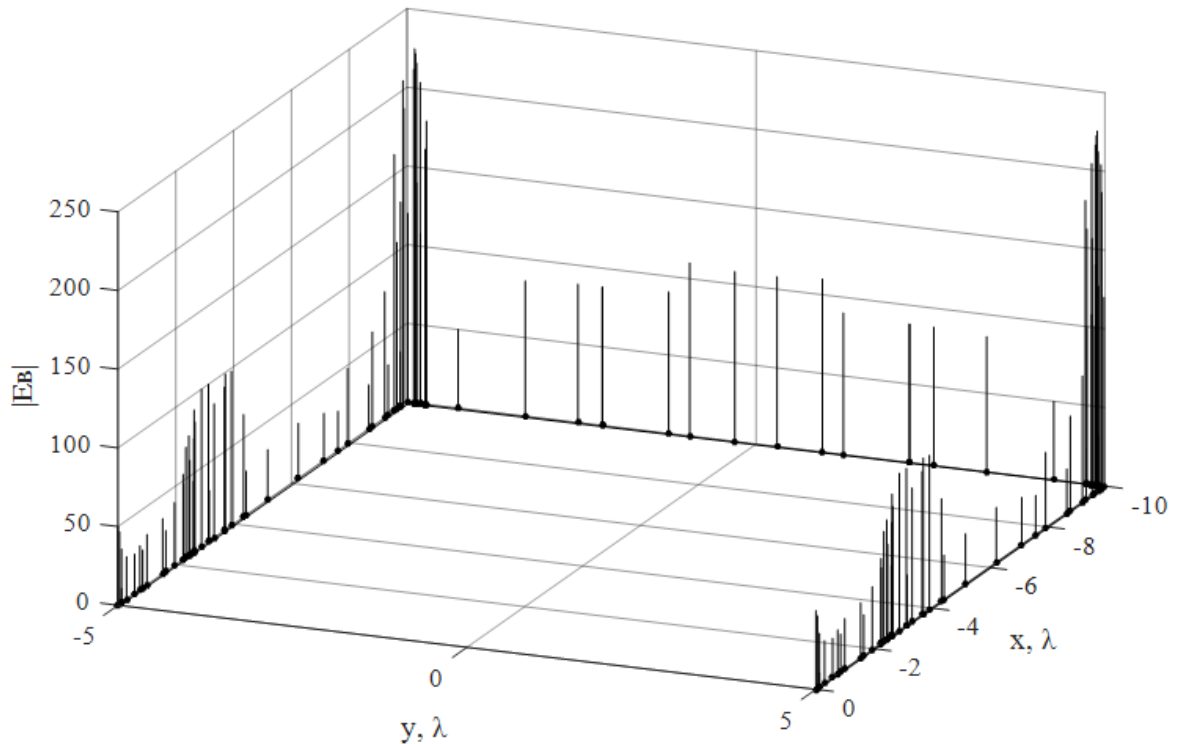


Рисунок 3. Распределение амплитуд ЛПВ на поверхности полости

На рис. 3 показано рассчитанное распределение амплитуд ЛПВ на поверхности полости. ЛПВ изображены точками.

Исследовалась устойчивость процесса сходимости численного решения задачи рассмотренным методом. В результате моделирования рассеяния электромагнитных волн на идеально проводящих полостях ранее было установлено [5], что когда характерный размер апертуры полости превышает 3λ (эта величина зависит от формы полости и поляризации падающей электромагнитной волны), система линейных алгебраических уравнений становится плохо обусловленной. Процедура избирательного оптимального сшивания, описанная в [5, 6], позволила привести возникающую систему линейных алгебраических уравнений к хорошо обусловленному виду. Это значительно улучшило устойчивость процесса численного решения задачи для рассмотренной полости (размер её апертуры соответствует квазиоптической области [5]).

ВЫВОДЫ

Таким образом, разработанный метод позволил восстановить по ДОР количество, амплитуды и координаты изотропных жестко связанных электродинамически независимых ЛПВ рассеяния металлической полости прямоугольной формы с размером апертуры, соответствующим квазиоптической области. При этом было необходимо выполнение следующих условий [3, 11]. Амплитуды ЛПВ должны быть одного

порядка, в поперечном и продольном направлениях ЛИ должны быть разнесены на расстояния, большие разрешающей способности аппаратуры $\delta = \lambda / (2\Delta\varphi)$, а максимальный размер объекта не должен превышать примерно 50λ .

В дальнейшем планируется использовать разработанный метод для получения рекомендаций по повышению эффективности применения различных диэлектрических материалов и радиопоглощающих покрытий для уменьшения радиолокационной заметности, как полостей, так и объектов техники в целом.

References

1. Гатилова И.Ю., Понькин В.А., Ужахов Т.С. Определение пространственной структуры локальных отражателей на поверхности объекта по амплитудной диаграмме обратного рассеяния // Радиотехника. 2000. № 6. С. 79-84.
2. Радиолокационные характеристики летательных аппаратов / Под ред. Л.Т. Тучкова. М.: Радио и связь, 1985. – 236 с.
3. Кутищев С.Н., Золототрубов Д.Ю. Метод восстановления локальных источников рассеяния на поверхности металлической полости прямоугольной формы по диаграмме обратного рассеяния // Сб. научных трудов I Междунар. НПК “Общество, техника и мышление: тенденции, перспективы и достижения”. Екатеринбург, 10 октября 2019 г. Екатеринбург: Профессиональная наука, 2019. С. 67-76.
4. Леонов А.С. Решение некорректно поставленных обратных задач: Очерк теории, практические алгоритмы и демонстрации в МАТЛАБ, Изд. 2-е. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 336 с.
5. Кутищев С.Н. Дифракция электромагнитных волн на полостях, апертурных антеннах и восстановление локальных источников рассеяния: дис. ... докт. физ.-мат. наук/ С.Н. Кутищев. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2012. – 301 с.
6. Mikhailov G.D., Kutishchev S.N. Scattering of electromagnetic waves from the open-ended waveguide cavities // Proceedings of Intern. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP'96). Chiba, Japan, 23-27 Sept. 1996, Vol. 3, PP. 641-644.
7. Штагер Е.А. Рассеяние радиоволн на телах сложной формы. М.: Радио и связь, 1986. – 182 с.
8. Кутищев С.Н. Метод восстановления параметров локальных источников рассеяния объекта по диаграмме обратного рассеяния // Изв. вузов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 12. С. 917-921.