

DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-1-201

УДК 621.396



Научная статья | Системный анализ, управление и обработка информации

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЯНИЯ ДВУХЧАСТОТНОГО СИГНАЛА НА ДИФРАКЦИОННОЙ СТРУКТУРЕ

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

На сегодняшний день одной из важных и актуальных задач науки электродинамики является исследование характеристик рассеяния различных сложных электродинамических объектов. 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 проблемы рассеяния электромагнитных волн связано с использованием соответствующих методов. В работе рассматривается решение задачи на основе метода интегральных уравнений. В ходе анализа двухчастотного воздействия рассмотрено использование вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: системный анализ; рассеяние электромагнитных волн; вейвлет-анализ

Для цитирования. Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П. Моделирование рассеяния двухчастотного сигнала на дифракционной структуре // *International Journal of Advanced Studies*. 2024. Т. 14, № 1. С. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-1-201

Original article | System Analysis, Management and Information Processing

MODELING OF TWO-FREQUENCY SIGNAL SCATTERING ON A DIFFRACTION STRUCTURE

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

To date, one of the important and urgent tasks of the science of electrodynamics is to study the scattering characteristics of various

complex electrodynamic objects. Among them, hollow structures can be distinguished, which are part of antenna systems and structures of various technical facilities. Their contribution to the levels of electromagnetic fields in the anterior hemisphere can be quite large. The correct solution to the problem of scattering of electromagnetic wave scattering characteristics is associated with the use of appropriate methods. The paper considers the solution of the problem based on the method of integral equations. During the analysis of the two-frequency effect, the use of the wavelet transform is considered.

Keywords: *system analysis; electromagnetic wave scattering; wavelet analysis*

For citation. *Avetisyan T.V., Lvovich Y.E., Preobrazhensky A.P. Modeling of Two-Frequency Signal Scattering on a Diffraction Structure. International Journal of Advanced Studies, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2024-14-1-201*

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]. Задачи 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. Представляет интерес с точки зрения практического применения оценить характеристики рассеяния таких компонентов при многочастотном воздействии.

Методика расчета на основе интегральных уравнений

Расчет эффективной площади рассеяния (ЭПР) осуществляется на основе метода интегральных уравнений.

На рисунке 1 представлен общий вид анализируемой электродинамической структуры.

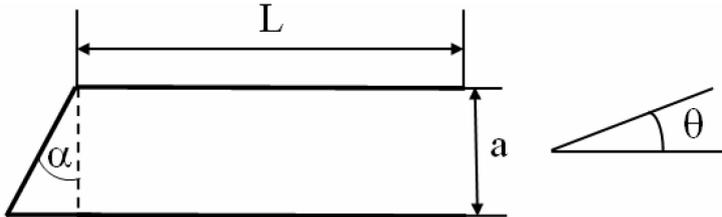


Рис. 1. Иллюстрация рассеяния электромагнитной волны на двумерной полой структуре

Каждый из размеров лежит в резонансной области. Всего в рассматриваемой структуре мы можем выделить F элементов. Структура состоит из металла (сталь), на него нанесены диэлектрические включения (показаны как заштрихованные области).

На поверхности рассматриваемой электродинамической структуры будет протекать электрический ток, который с учетом граничных условий входит в следующее интегральное уравнение [3,4]:

$$\begin{aligned}
 & J_z(u_2) + 2 \int_{\ell} J_z(u'_2) [i\omega \epsilon G \cos(\theta - \theta_s) Z(u'_2) + \frac{Z(u'_2)}{i\omega \mu} + \frac{\partial G}{\partial u_{1p}}] d\ell = \\
 & = -2 \int_{\ell_s} (j^{es} \frac{\partial G}{\partial u_{1p}} + j^{ms} (j\omega \epsilon G \cos(\theta - \theta_s) + \frac{1}{j\omega \mu} \frac{\partial^2 G}{\partial u_2 \partial u_{2p}})) d\ell, \quad (1)
 \end{aligned}$$

в этом уравнении H_0^2 – функция Ханкеля второго рода с нулевым порядком [5, 6], $G = (1/4j) H_0^2(kR)$ – функция Грина, которая соответствует двумерному случаю [7], ℓ и ℓ_s – контуры, по которым ведется процесс интегрирования при неизвестных и сторонних токах; $R = \sqrt{(x_s - x')^2 + (y_s - y')^2}$ – расстояние, которое будет между точкой, в которой находится наблюдатель и точкой, которая соответствует интегрированию; j^{es} и j^{ms} – значение плотности, которая соответствует сторонним электрическим и магнитным токам; q, q_s – угол, соответствующий приемному устройству и угол, связанный с процессами интегрирования; u_2 и u_2 – значе-

ние координат точки, в которой находится ток и точки, соответствующей процессу интегрирования; $Z(u_2)$ – значение импеданса в соответствующем участке контура ℓ ; $\partial G / \partial u_{1p}, \partial G / \partial u_{2p}$ – для контура значения нормальной производной и p касательной производной функции Грина; $\partial G / \partial u_2$ – для точки, где находится ток значение нормальной производной функции Грина.

$$J_z(u_2) + 2 \int_{\ell} [J_z(u_2) [j\omega \varepsilon G \cos(\theta - \theta_p) Z(u_2) + \frac{Z(u_2)}{j\omega \mu} + \frac{\partial G}{\partial u_{1p}}] + \frac{1}{j\omega \mu} \frac{\partial^2 G}{\partial u_2 \partial u_{2p}}] d\ell = -2\bar{n} \times \bar{H}^i, \quad (2)$$

здесь \bar{H}^i – является вектором радиоволны.

Метод моментов [4, 5] на контуре электродинамической структуры применяется для того, чтобы определить электрические токи $J_z(r)$. Основная идея такого подхода связана с дискретизацией контура электродинамической структуры. На базе метода моментов реализуется процесс прямого численного решения интегрального уравнения.

Рассматриваемая структура имеет как плоские поверхности, так и ребра. Контур автоматическим образом учитывается в интегральном уравнении.

Базисные и пробные функции могут выбираться с учетом различных параметров. В качестве основных критериев в ходе подобного выбора можно указать относительно простое вычисление соответствующих интегралов, а также близость функций к токам на наблюдаемых участках контуров. Анализ показал, что при расчетах для соблюдения необходимой точности достаточным будет выбор кусочно-постоянных функций в виде базисных и d -функций Дирака в виде пробных.

В ходе численного решения мы осуществляем переход от интегрального уравнения (2) к системе линейных алгебраических уравнений [4, 5]

$$[A_{pq}][J_q] = [U_p], \quad (3)$$

при этом матричные элементы по обобщенным импедансам будут вычисляться таким образом

$$A_{pq} = \int \left\{ \begin{aligned} & i_q + \frac{\Delta l}{2} \left[\frac{jk}{2R} H_1^{(2)}(kR) [(x_p - x_q)^2 \cos(\theta_q) - \right. \\ & \left. i_q - \frac{\Delta l}{2} \left[-(y_p - y_q)^2 \cos(\theta_{qm}) \right] + \frac{\omega \varepsilon}{2} H_0^{(2)}(kR) Z(l) \right] \end{aligned} \right\} dl.$$

Множители разложения $J(z)$ соответствуют вектору-столбцу $[J_q]$.

Вектор-столбец эквивалентных потенциалов соответствует $U_p = -(\cos(\theta_p) \cos(\theta) + \sin(\theta_p) \sin(\theta)) \exp(jk(x_p \cos(\theta_p) + y_p \sin(\theta_p)))$.

Может возникать сингулярность в ядре интегральных уравнений. Это будет когда совпадают координаты точек наблюдения и интегрирования, когда интегральное уравнение решается при помощи метода моментов. Тогда, если $R \rightarrow 0$, то двумерная функция Грина $H_0^{(2)}(kR) \rightarrow \Delta \ell [1 - (\frac{j}{2\pi}) [\gamma - 1 + \ln(\frac{k\Delta \ell}{4})]]$ [6, 7], при этом учитываем, что $\gamma = 0,577215664$ – это постоянная Эйлера.

После определения $[J_m]$ мы можем найти рассеянные поля.

Для этого используется интеграл Кирхгофа. Мы опираемся на такое выражение:

$$H(\theta_r) = \exp(-jkr) \sqrt{\frac{k}{2\pi r}} \int J_z(r') \exp(jkr' \cos(\theta_r)) dr'. \tag{4}$$

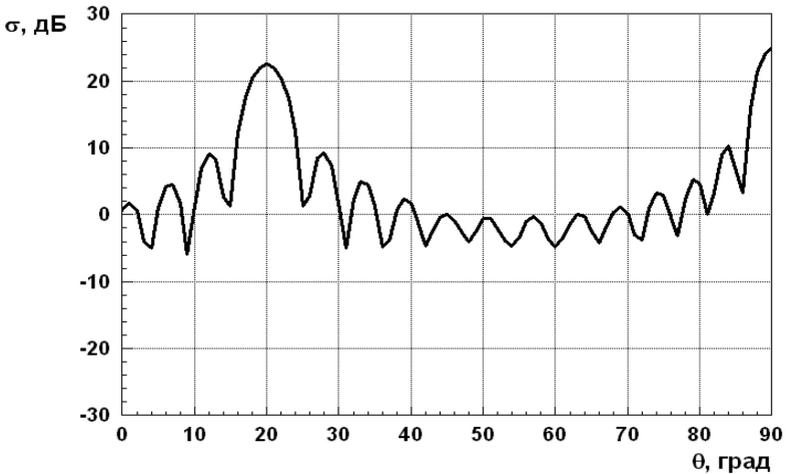


Рис. 2. Зависимость ЭПР полой структуры от угла наблюдения

В нем q_r – является углом наблюдения; k – волновое число; r – радиус-вектор точки наблюдения в дальней зоне.

Проведение расчета эффективной площади рассеяния (ЭПР) осуществляется таким образом [8]: $\sigma_{\text{двум}} = 2\pi r |H(\theta_r)|^2$.

На рисунке 2 приведена зависимость ЭПР от угла наблюдения для полости со следующими размерами $a=5\lambda$, $L=5\lambda$, $\alpha=20^\circ$.

Оценка характеристик полой структуры при многочастотном воздействии

Далее рассмотрим падающую волну в виде не монохроматического, а двухчастотного воздействия

$$x(t) = A_1(t)\cos(2\pi f_1 t) + A_2(t)\cos(2\pi f_2 t) \quad (5)$$

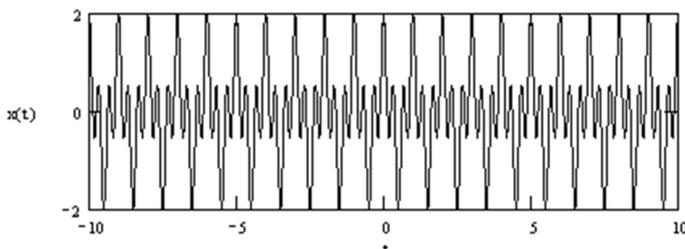


Рис. 3. Иллюстрация первого двухчастотного сигнала

Также используется сигнал, в котором два колебания оказываются разнесенными по времени.

$$y(t) = \begin{cases} A_1 \cos(2\pi f_1 t), & \text{если } t \leq t_0 \\ A_2 \cos(2\pi f_2 t), & \text{если } t > t_0 \end{cases} \quad (6).$$

На рисунке 5 приведены спектры рассматриваемых сигналов. Первый сигнал – а), второй сигнал – б).

Видно, что они являются одинаковыми, то есть, нет возможности различения таких сигналов.

Для того, чтобы при двухчастотном воздействии сигналы были различимы, предлагается использовать вейвлет-преобразование [9, 10]. В качестве вейвлета рассматриваем производную гауссова импульса $y(x) = \exp(0.5x^2)$.

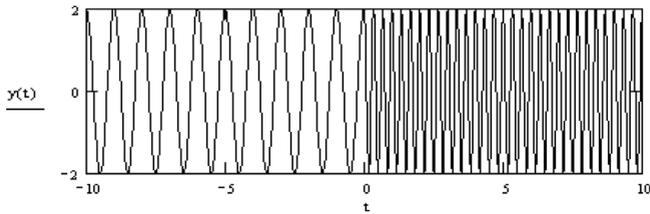
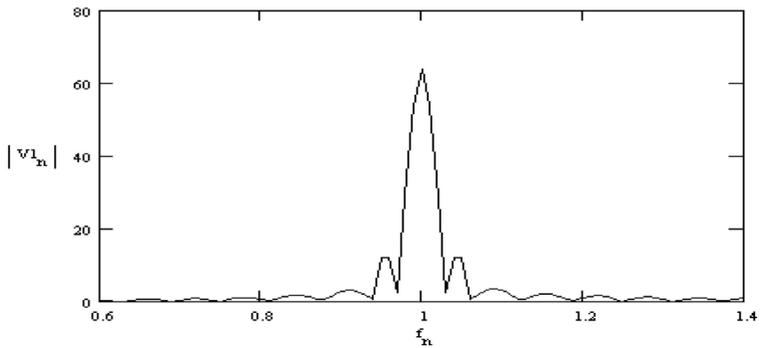
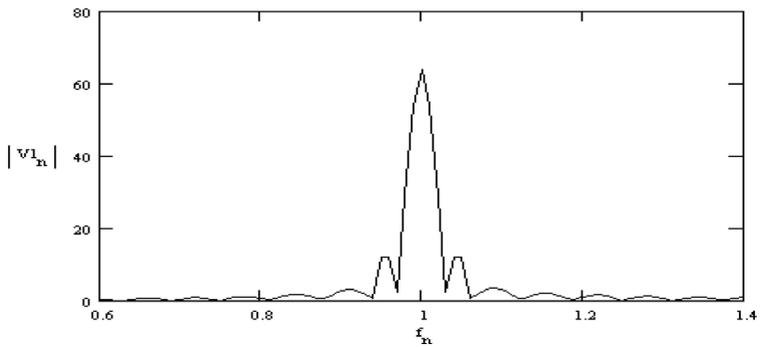


Рис. 4. Иллюстрация второго двухчастотного сигнала



а)



б)

Рис. 5. Спектры падающей электромагнитной волны

Вейвлет имеет вид $V(x) = (x^2 - 1) \exp(0.5x^2)$.

Введем подстановку $x = (t - b)/a$, а также множитель $a^{-1/2}$, что позволит перейти от исходного вейвлета к базисному. Тогда

$$Vl(a, b, t) = (1/\sqrt{a})V(x).$$

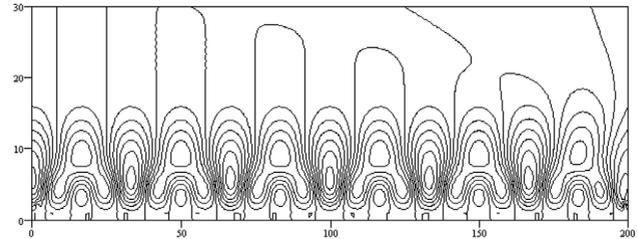
Для вейвлета выполняются следующие ограничения:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |V(t)|^2 < \infty, \int_{-\infty}^{\infty} V(t) = 0.$$

Прямое и обратное вейвлет-преобразование представляются соответствующим образом: $C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t)V(\frac{t-b}{a})dt$, $x(t) = \frac{1}{K_C} \int_0^{\infty} \frac{da}{a^2 \sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} C(a,b)V(\frac{t-b}{a})dt$, здесь $V(a,b,t)$ – это функция, которая описывает вейвлет, K_C -нормирующий коэффициент.

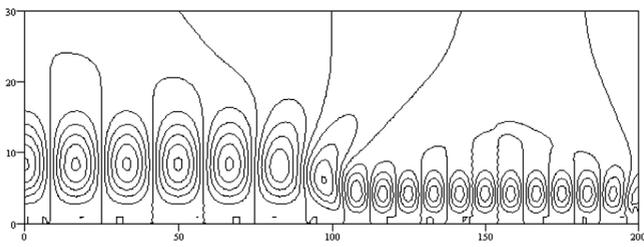
Коэффициенты прямого вейвлет-преобразования в виде изоэклинов для первого случая приведены на рисунке 6 а), для второго случая приведены на рисунке 6 б).

Видны существенные различия в спектрограммах анализируемых сигналов. Четким образом прослеживаются локальные изменения, которые есть в сигналах, связанные с тем, что резким образом меняется частота.



C

а)



C

б)

Рис. 6. Коэффициенты прямого вейвлет-преобразования

Заключение

Таким образом, в работе приведены результаты исследования двухчастотного воздействия при рассеянии электромагнитной волны на двумерной полости. Показано, что с использованием вейвлет-преобразования можно осуществлять различение сигналов. Рассмотрены спектры электромагнитных волн. Построены графики для коэффициенты прямого вейвлет-преобразования.

Список литературы

1. Кобак В. О. Радиолокационные отражатели. М.: Сов. радио, 1972. 248 с.
2. Боровиков В. А., Кинбер Б. Е. Геометрическая теория дифракции. М.: Связь, 1978. 247 с.
3. Инспекторов Э.М. Численный анализ электромагнитного возбуждения проводящих тел. Мн.: Университетское, 1987. 116 с.
4. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. М.: Мир, 1977. 485 с.
5. Галишников Т. Н., Ильинский А.С. Численные методы в задачах дифракции. М.: МГУ, 1987. 207 с.
6. Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М.: Наука, 1979.
7. Васильев Е.Н. Возбуждение тел вращения. М.: Радио и связь, 1987. 270 с.
8. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1990, vol. 38, no. 9, pp. 1413-1420. <https://doi.org/10.1109/8.56993>
9. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: РХД, 2001. 464 с.
10. Дьяконов В.П. Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 440 с.

References

1. Kobak V. O. Radar reflectors. Moscow: Sov. radio Publ., 1972, 248 p.
2. Borovikov V.A., Kinber B.E. Geometrical Theory of Diffraction. Moscow: Svyaz Publ., 1978, 247 p.

3. Inspectorov E.M. Numerical Analysis of Electromagnetic Excitation of Conducting Bodies. Mn.: Universitetskoe Publ., 1987, 116 p.
4. Computational methods in electrodynamics / Edited by R. Mitra. M.: Mir Publ., 1977, 485 p.
5. Galishnikova T.N., Ilyinsky A.S. Numerical methods in diffraction problems. Moscow State University, 1987, 207 p.
6. Abramovitz M., Stigan I. Handbook on special functions. Moscow: Nauka Publ., 1979.
7. Vasiliev E.N. Excitation of Bodies of Rotation. M.: Radio and Communication Publ., 1987, 270 p.
8. Ling H. RCS of waveguide cavities: a hybrid boundary-integral/modal approach. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1990, vol. 38, no. 9, pp. 1413-1420. <https://doi.org/10.1109/8.56993>.
9. Dobeshi I. Ten lectures on wavelets. Izhevsk: RCD Publ., 2001, 464 p.
10. Diakonov V.P. Wavelets. From theory to practice. Moscow: SO-LON-Press Publ., 2004, 440 p.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Аветисян Татьяна Владимировна, преподаватель колледжа, специалист проектного отдела ВИБТ
*Колледж ВИБТ; Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий
ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация
vtatyana_avetisyan@mail.ru*

Львович Яков Евсеевич, профессор, доктор технических наук, профессор
*Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий
ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация
Komkovvivi@yandex.ru*

Преображенский Андрей Петрович, профессор, доктор технических наук, профессор
Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования Воронежский институт высоких технологий
ул. Ленина, 73а, г. Воронеж, 394043, Российская Федерация
Komkovvvt@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Tatiana V. Avetisyan, project specialist VIVT
College of the Voronezh Institute of High Technologies; Voronezh Institute of High Technologies
73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation
vtatyana_avetisyan@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3559-6070>

Yakov E. Lvovich, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor
Voronezh Institute of High Technologies
73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation
Komkovvvt@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7051-3763>

Andrey P. Preobrazhensky, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor
Voronezh Institute of High Technologies
73a, Lenin Str., Voronezh, 394043, Russian Federation
Komkovvvt@yandex.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6911-8053>

Поступила 13.11.2023

После рецензирования 30.11.2023

Принята 05.12.2023

Received 13.11.2023

Revised 30.11.2023

Accepted 05.12.2023