

УДК 621.396

Т.В. Глотова, Т.В.Мельникова

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН
НА МАГНИТО-ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ОБЪЕКТЕ НА ОСНОВЕ
АДАПТИВНОГО МЕТОДА**

Воронежский институт высоких технологий

В данной статье рассматривается адаптивный интегральный метод для решения задачи рассеяния электромагнитной волны на объекте, который состоит из нескольких магнито-диэлектрических материалов. Интегральное уравнение, решаемое с помощью такого подхода, помогает исключить резонансные явления в диэлектриках и получать весьма точные результаты. Применен метод моментов для того, чтобы осуществить процесс дискретизации интегральных уравнений, и дана итоговая матрица системы, которая решается на основе итерационного подхода. В результате уменьшаются требования к памяти для хранения промежуточных результатов и для ускорения матрично-векторных умножений. Приведены численные результаты, которые иллюстрируют точность и эффективность рассматриваемого метода.

Ключевые слова: рассеяние радиоволн, метод моментов, интегральное уравнение, магнито-диэлектрические материалы, алгоритм.

Методы интегральных уравнений широко используются для решения проблем рассеяния электромагнитных волн [1-8]. В рамках указанного подхода сформулированы различные задачи рассеяния с использованием соответствующих интегральных уравнений и подходы по сведению к системам линейных уравнений, на основе использования метода моментов.

Система линейных уравнений может быть решена с помощью прямого или итерационного способа. Прямые способы, например, метод Гаусса и LU-разложение, требуют $O(N^3)$ операций, в то время как в итерационных методах, таких как Гаусса-Зейделя и метод сопряженных градиентов методы, необходимо время $O(N^2)$ при операциях умножения матрицы на вектор на каждой итерации.

В требования к памяти для этих двух способов это обычно $O(N^2)$. С такой вычислительной сложностью и требованиями к памяти бывает слишком сложно решить масштабные задачи рассеяния.

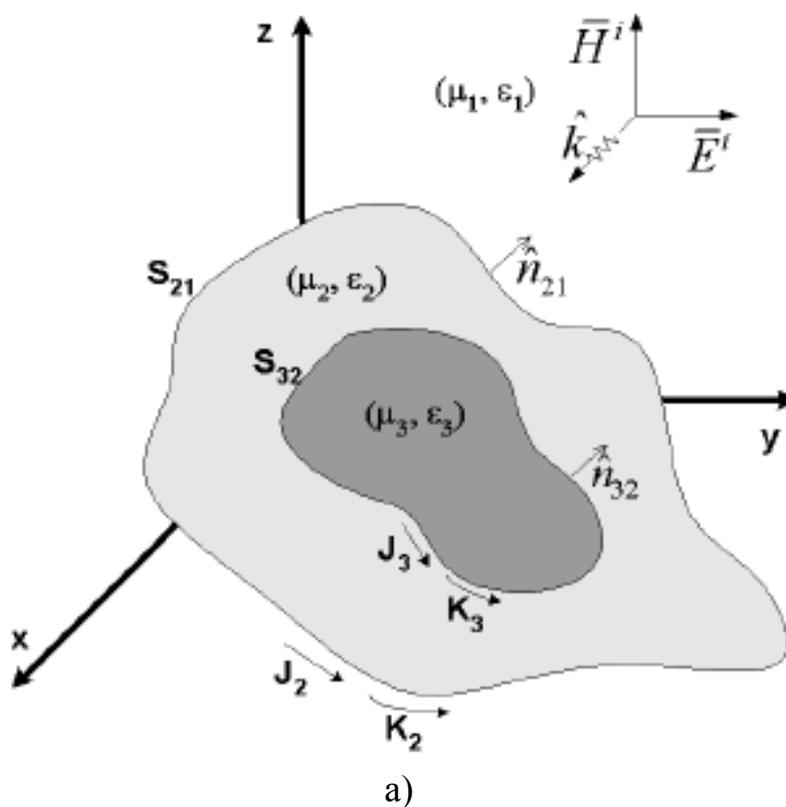
Проблемным местом в итерационных способах решений является умножение матрицы на вектор.

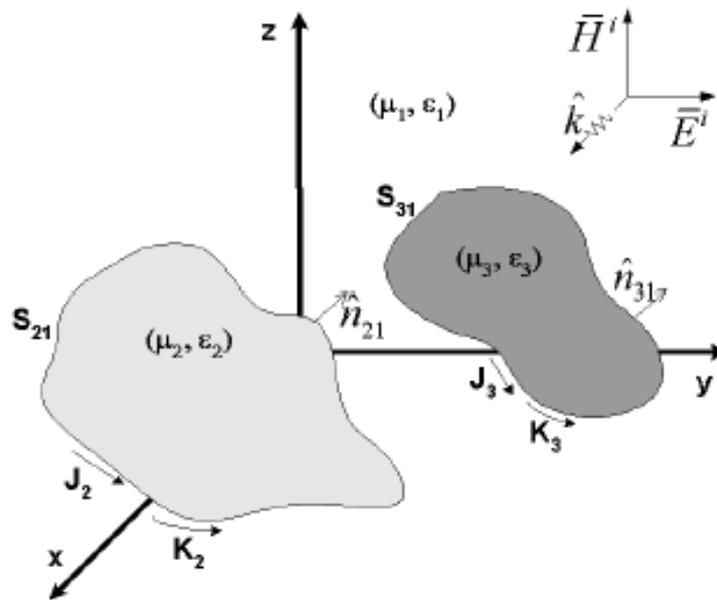
Были предложены несколько алгоритмов для ускорения умножения матриц на вектор, такой как мультипольный метод [9, 10] и его расширения [11-13], позволяющие достичь сложности $O(N^{1.5})$ и $O(N \log N)$, соответственно. Однако большой постоянный коэффициент в асимптотическом разложении требует больших значений N для того, чтобы получить преимущество в методе моментов. Были предложены

сеточные методы на основе таких подходов как сопряженно-градиентный, быстрое преобразование Фурье (БПФ) [14]. БПФ использует равномерные прямоугольные сетки для модели с произвольной формой геометрии, таким образом, он будет давать немного неточные результаты в окончательном решении.

При решении задач рассеяния на объектах, состоящих из магнито-диэлектрических материалах, можно столкнуться с вышеуказанными проблемами. Ограничения можно преодолеть с помощью быстрого алгоритма. В данной работе целью является применение для решения смешанного подхода, который отличается от обычного метода моментов.

На Рисунке 1 приведена постановка задачи – рассеяние электромагнитной волны на магнито-диэлектрическом объекте. Причем возможны два случая – один материал полностью покрывает другой (Рисунок 1а) и два материала рассматриваются отдельно (Рисунок 1б).





б)

Рисунок 1 – Схема рассеяния электромагнитной волны на магнито-диэлектрическом объекте.

$$\hat{n}_{21} \times \vec{E}^i = -\hat{K}_2 - \hat{n}_{21} \times \left\{ \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{21} + k_2^2 \bar{A}_{21}}{j\omega \epsilon_1} - \nabla \times \bar{F}_{21} \right\} \text{ на } S_{21}$$

$$\hat{n}_{21} \times \left\{ \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{32} + k_2^2 \bar{A}_{32}}{-j\omega \epsilon_2} + \nabla \times \bar{F}_{32} \right\} = \hat{K}_2 - \hat{n}_{21} \times \left\{ \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{22} + k_2^2 \bar{A}_{22}}{j\omega \epsilon_2} - \nabla \times \bar{F}_{32} \right\} \text{ на } S_{21}$$

$$\hat{n}_{32} \times \left\{ \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{22} + k_2^2 \bar{A}_{22}}{-j\omega \epsilon_2} + \nabla \times \bar{F}_{22} \right\} = -\hat{K}_3 - \hat{n}_{32} \times \left\{ \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{32} + k_2^2 \bar{A}_{32}}{j\omega \epsilon_2} - \nabla \times \bar{F}_{32} \right\} \text{ на } S_{32}$$

$$0 = \hat{K}_3 - \hat{n}_{32} \times \left\{ \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{33} + k_3^2 \bar{A}_{33}}{j\omega \epsilon_3} - \nabla \times \bar{F}_{33} \right\} \text{ на } S_{32}$$

$$\hat{n}_{21} \times \vec{H}^i = \bar{J}_2 - \hat{n}_{21} \times \left\{ \nabla \times \bar{A}_{21} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{21} + k_1^2 \bar{F}_{21}}{j\omega \mu_1} \right\} \text{ на } S_{21}$$

$$\hat{n}_{21} \times \left\{ -\nabla \times \bar{A}_{32} - \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{32} + k_2^2 \bar{F}_{32}}{j\omega \mu_2} \right\} = -\bar{J}_2 - \hat{n}_{21} \times \left\{ \nabla \times \bar{A}_{22} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{22} + k_2^2 \bar{F}_{22}}{j\omega \mu_2} \right\} \text{ на } S_{21}$$

$$\hat{n}_{32} \times \left\{ -\nabla \times \bar{A}_{22} - \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{22} + k_2^2 \bar{F}_{22}}{j\omega \mu_2} \right\} = \bar{J}_3 - \hat{n}_{32} \times \left\{ \nabla \times \bar{A}_{32} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{32} + k_2^2 \bar{F}_{32}}{j\omega \mu_2} \right\} \text{ на } S_{32}$$

$$0 = \bar{J}_3 - \hat{n}_{32} \times \left\{ \nabla \times \bar{A}_{33} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{33} + k_1^2 \bar{F}_{33}}{j\omega\mu_3} \right\} \text{ на } S_{32}$$

где векторные потенциалы \bar{A}_{ji} и \bar{F}_{ji} даются выражениями

$$\bar{A}_{ji} = \int \int \bar{J}_j g_i(r, r') dS$$

$$\bar{F}_{ji} = \int \int \bar{K}_j g_i(r, r') dS$$

$$g_i(r, r') = \frac{\exp(-jk_i|r-r'|)}{4\pi|r-r'|}$$

$$\bar{J}_j = \hat{n}_{ji} \times \vec{H}$$

$$\bar{K}_j = \vec{E} \times \hat{n}_{ji}$$

$$\hat{n}_{21} \times \vec{E}^i = -\hat{n}_{21} \times \left\{ \begin{array}{l} \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{21} + k_1^2 \bar{A}_{21}}{j\omega\epsilon_1} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{22} + k_2^2 \bar{A}_{22}}{j\omega\epsilon_2} - \nabla \times \bar{F}_{21} - \\ - \nabla \times \bar{F}_{22} - \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{32} + k_2^2 \bar{A}_{32}}{j\omega\epsilon_2} + \nabla \times \bar{F}_{32} \end{array} \right\}$$

$$\hat{n}_{21} \times \vec{H}^i = -\hat{n}_{21} \times \left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \bar{A}_{21} + \nabla \times \bar{A}_{22} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{21} + k_1^2 \bar{F}_{21}}{j\omega\mu_1} + \\ + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{22} + k_2^2 \bar{F}_{22}}{j\omega\mu_2} - \nabla \times \bar{A}_{32} - \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{32} + k_2^2 \bar{F}_{32}}{j\omega\mu_2} \end{array} \right\}$$

$$0 = -\hat{n}_{32} \times \left\{ \begin{array}{l} -\frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{22} + k_2^2 \bar{A}_{22}}{j\omega\epsilon_2} + \nabla \times \bar{F}_{22} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{32} + k_2^2 \bar{A}_{32}}{j\omega\epsilon_2} + \\ + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{A}_{33} + k_3^2 \bar{A}_{33}}{j\omega\epsilon_3} - \nabla \times \bar{F}_{32} - \nabla \times \bar{F}_{33} \end{array} \right\}$$

$$0 = -\hat{n}_{32} \times \left\{ \begin{array}{l} -\nabla \times \bar{A}_{22} - \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{22} + k_2^2 \bar{F}_{22}}{j\omega\mu_2} + \nabla \times \bar{A}_{32} + \nabla \times \bar{A}_{33} + \\ + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{32} + k_2^2 \bar{F}_{32}}{j\omega\mu_2} + \frac{\nabla \nabla \cdot \bar{F}_{33} + k_3^2 \bar{F}_{33}}{j\omega\mu_3} \end{array} \right\}$$

Применяется метод моментов [15-20]

$$\bar{I}_j = \sum I_{n_{i-1}} f_{n_{i-1}}$$

$$\hat{K}_j = \sum M_{n_{i-1}} f_{n_{i-1}}$$

$$\begin{bmatrix} [Z_{mn}^{11}] & [C_{mn}^{11}] & \theta[Z_{mn}^{12}] & \theta[C_{mn}^{12}] \\ [D_{mn}^{11}] & [Y_{mn}^{11}] & \theta[D_{mn}^{12}] & \theta[Y_{mn}^{12}] \\ \theta[Z_{mn}^{21}] & \theta[C_{mn}^{21}] & [Z_{mn}^{22}] & [C_{mn}^{22}] \\ \theta[D_{mn}^{21}] & \theta[Y_{mn}^{21}] & [D_{mn}^{22}] & [Y_{mn}^{22}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_1] \\ [M_1] \\ [I_2] \\ [M_2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [E_m^1] \\ [H_m^1] \\ \delta[E_m^2] \\ \delta[H_m^2] \end{bmatrix}$$

где $([I_1], [M_1])$ и $([I_2], [M_2])$ являются коэффициентами при эквивалентных электрических и магнитных токах на S_{2i} и S_{3i} , соответственно.

Элементы подматриц для $u \neq v$ определяются таким образом:

$$Z_{mn}^{uv} = - \int_{T_{m_u}} f_{m_u}(r) (j\omega\mu_a P_{n_v}^a + \frac{j}{\omega\epsilon_a} Q_{n_v}^a) dS_{m_u}$$

$$Y_{mn}^{uv} = - \int_{T_{m_u}} f_{m_u}(r) (j\omega\epsilon_a P_{n_v}^a + \frac{j}{\omega\mu_a} Q_{n_v}^a) dS_{m_u}$$

$$C_{mn}^{uv} = - \int_{T_{m_u}} f_{m_u}(r) (\nabla \times P_{n_v}^a) dS_{m_u}$$

$$D_{mn}^{uv} = -C_{mn}^{uv}$$

для $u = v$ мы имеем:

$$Z_{mn}^{uv} = - \int_{T_{m_u}} f_{m_u}(r) (j\omega\mu_b P_{n_v}^b + \frac{j}{\omega\epsilon_b} Q_{n_v}^a + j\omega\mu_{u+1} P_{n_u}^{u+1} + \frac{j}{\omega\epsilon_{u+1}} Q_{n_u}^{u+1}) dS_{m_u}$$

$$Y_{mn}^{uv} = \int_{T_{m_u}} f_{m_u}(r) (j\omega\epsilon_a P_{n_u}^b + \frac{j}{\omega\mu_b} Q_{n_u}^b + j\omega\epsilon_{u+1} P_{n_u}^{u+1} + \frac{j}{\omega\mu_{u+1}} Q_{n_u}^{u+1}) dS_{m_u}$$

$$C_{mn}^{uv} = - \int_{T_{m_u}} f_{m_u}(r) (\nabla \times P_{n_u}^b + \nabla \times P_{n_u}^{u+1}) dS_{m_u}$$

$$D_{mn}^{uu} = -C_{mn}^{uu}$$

где

$$P_{n_v}^u = \int_{T_{n_v}} f_{n_v}(r') g_u(r, r') dS_{n_v}$$

$$Q_{n_v}^u = \nabla \int_{T_{n_v}} \nabla'_s f_{n_v}(r') g_u(r, r') dS_{n_v}$$

Здесь ϵ_u и μ_u – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды u .

На Рисунке 2 приведен пример тестового расчета для двух концентрических сфер с радиусом $r=0,85$ м $\epsilon_1=1.35-j0.25$, $R=1,15$ м $\epsilon_2=1.7-j0.9$, при частоте волны 800 МГц. Линией обозначен рассматриваемый подход, а крестиками – обычный метод моментов. Метод может быть дополнен методами искусственного интеллекта [21-25].

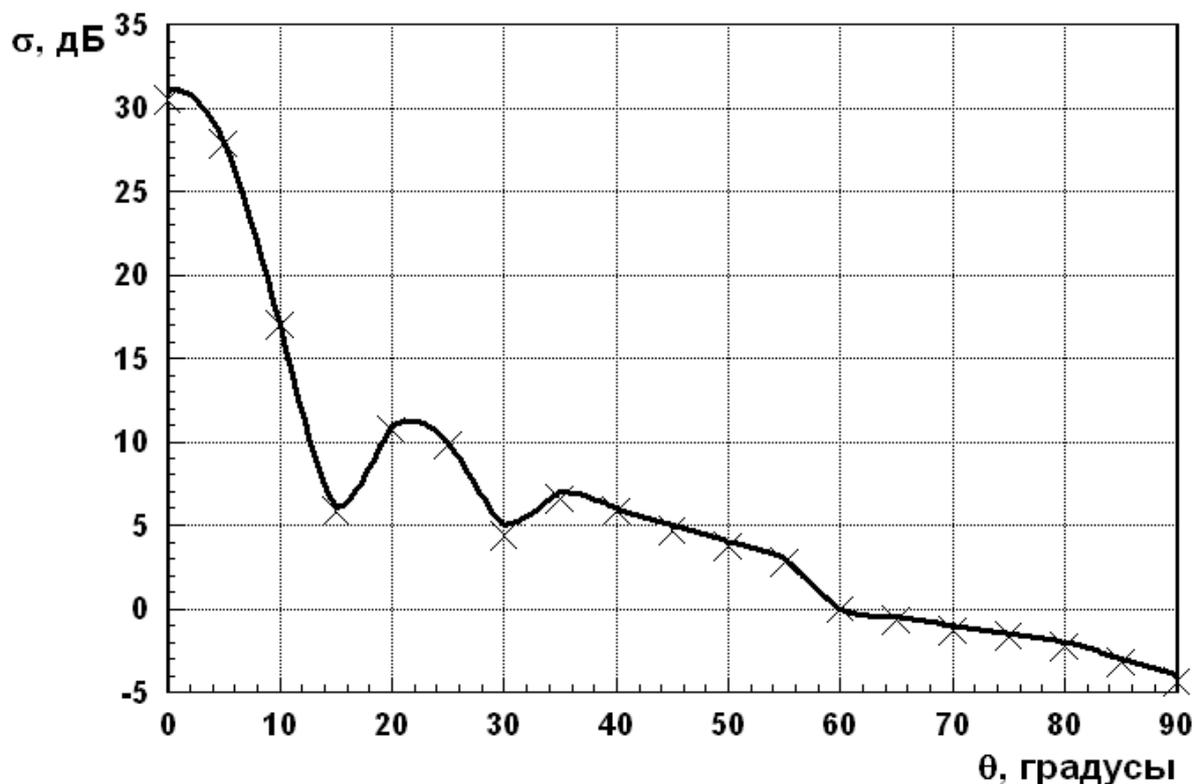


Рисунок 2 – Результаты расчета бистатической эффективной площади рассеяния концентрических сфер.

Вывод. Таким образом, на основе рассмотренного адаптивного интегрального метода, применяемого для решения задачи рассеяния электромагнитной волны на объекте, который состоит из нескольких магнито-диэлектрических материалов, можно упростить процедуру вычислений. В работе приведен пример расчета бистатической характеристики рассеяния для диэлектрических сфер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Львович И.Я. Расчет характеристик металлодиэлектрических антенн / И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 11. С. 26-29.
2. Максимова А. А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А. А. Максимова, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 53-56.
3. Преображенский А.П. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на несимметричном объекте/ А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров, К.В.Кайдакова // В мире научных открытий. 2015. № 8. С. 526.
4. Львович И.Я. Построение алгоритма оценки средних характеристик рассеяния полых структур / И.Я.Львович, Я.Е.Львович, А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2014. № 6. С. 2-5.
5. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / А.П. Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
6. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов в диапазоне длин волн с использованием результатов измерения характеристик рассеяния на дискретных частотах / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2004. № 5. С. 32-35.
7. Преображенский А.П. Алгоритмы прогнозирования радиолокационных характеристик объектов при восстановлении радиолокационных изображений / А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2004. Т. 17. № 5. С. 85-87.
8. Преображенский А.П. Оценка возможностей комбинированной методики для расчета ЭПР двумерных идеально проводящих полостей / А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 37-40.
9. Rokhlin V. Rapid solution of integral equation of scattering theory in two dimensions / V.Rokhlin // J. Comput. Phys., Vol. 86, 414-439, Feb. 1990.

10. Coifman, R. Wandzura The fast multipole method for the wave equation: A pedestrian prescription / R.Coifman, V. Rokhlin, S. Wandzura // IEEE Antennas Propagat. Mag., Vol. 35, 7-12, June 1993.
11. Lu C. C. A multilevel algorithm for solving boundary integral equations of wave scattering / C. C.Lu and W. C. Chew// Microwave Opt. Tech. Lett., Vol. 7, No. 10, 466-470, July 1994.
12. J. M.Song and W. C. Chew Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering / J. M.Song W. C. Chew // Microwave Opt. Tech. Lett., Vol. 10, No. 1, 14-19, Sept. 1995.
13. Song, J. M. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects / J. M.Song , C. C. Lu, d W. C. Chew// IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 45, No. 10, 1488-1493, Oct. 1997.
14. Sarkar T. K. Application of FFT and the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic radiation from electrically large and small conducting bodies / T. K.Sarkar , E. Arvas, S. M. Rao // IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 34, No. 5, 635-640, May 1986.
15. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик идеально проводящей полости в диапазоне длин волн /А.П.Преображенский // Телекоммуникации. 2005. № 12. С. 29-31.
16. Львович И.Я. Разработка информационного и программного обеспечения САПР дифракционных структур и радиолокационных антенн / И.Я.Львович, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 12. С. 63-68.
17. Канавин С. В. Перспективы применения систем мобильного широкополосного доступа в сетях подвижной радиосвязи на основе стандартов mobile WIMAX и LTE / С. В. Канавин, А. С. Лукьянов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 79-82.
18. Львович И.Я. Программный комплекс для автоматизированного анализа характеристик рассеяния объектов с применением математических моделей / И.Я.Львович, А.П.Преображенский, Р.П.Юров, О.Н.Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2006. Т. 24. № 2. С. 96-98.
19. Преображенский А.П. Алгоритм расчета радиолокационных характеристик полостей с использованием приближенной модели / А.П.Преображенский, О.Н.Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2005. Т. 21. № 4. С. 17-19.
20. Преображенский А.П. Исследование возможности определения формы объекта в окрестности восстановления локальных отражателей на поверхности объектов по их диаграммам обратного рассеяния / А.П. Преображенский // Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 29-32.

21. Lvovich Y.Y. The use of "ant" algorithm in constructing models of objects that have maximum average values of the scattering characteristics / Y.Y.Lvovich, I.Y.Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Life Science Journal. 2014. T. 12. № 12. С. 463.
22. Васильев Е.М. Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией / Е.М.Васильев, И.В.Крутских // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 2. С. 21-23.
23. Подвальный С.Л. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления / С.Л.Подвальный, Е.М.Васильев // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57. № 3. С. 4-8.
24. Ткалич С.А. Основания и возможности использования искусственных нейросетей в системах прогнозирования / С.А.Ткалич, Е.М.Васильев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 2. С. 37-38.
25. Васильев Е.М. Многоальтернативное управление в хаотических системах связи / Е.М. Васильев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 11. С. 155-158.

T. V. Glotova, T.V.Melnikova

**THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF SCATTERING OF
ELECTROMAGNETIC WAVES IN MAGNETO-DIELECTRIC OBJECT
BASED ON THE ADAPTIVE METHOD**

Voronezh Institute of High Technologies

This paper discusses how adaptive integral method for solving the problem of scattering of electromagnetic waves on the object, which consists of several magneto-dielectric materials can be used. The integral equation to be solved with the help of this approach helps to eliminate resonance phenomena in dielectrics, and to obtain very accurate results. The method of moments is applied in order to carry out the process of discretization of integral equations is given and the resulting matrix system which is solved based on the iterative approach. As a result, the memory requirements is reduced to store intermediate results and to speed up matrix-vector multiplications. Numerical results that illustrate the accuracy and efficiency of this method are given.

Keywords: scattering of radio waves, method of moments, integral equation, magneto-dielectric materials, algorithm.

REFERENCES

1. L'vovich I.Ya. Raschet kharakteristik metallodielektricheskikh antenn / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. Т. 1. № 11. S. 26-29.

2. Maksimova A. A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A. A. Maksimova, A. G. Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. № 1. S. 53 - 56.
3. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie rasseyaniya elektromagnitnykh voln na nesimmetrichnom ob"ekte/ A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov, K.V.Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. 2015. № 8. S. 526.
4. L'vovich I.Ya. Postroenie algoritma otsenki srednikh kharakteristik rasseyaniya polykh struktur / I.Ya.L'vovich, Ya.E.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2014. № 6. S. 2-5.
5. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovanie radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov s radiopogloshchayushchimi pokrytiyami v diapazone dlin voln / A.P. Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 4. S. 21-24.
6. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovanie radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov v diapazone dlin voln s ispol'zovaniem rezul'tatov izmereniya kharakteristik rasseyaniya na diskretnykh chastotakh / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2004. № 5. S. 32-35.
7. Preobrazhenskiy A.P. Algoritmy prognozirovaniya radiolokatsionnykh kharakteristik ob"ektov pri vosstanovlenii radiolokatsionnykh izobrazheniy / A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2004. T. 17. № 5. S. 85-87.
8. Preobrazhenskiy A.P. Otsenka vozmozhnostey kombinirovannoy metodiki dlya rascheta EPR dvumernykh ideal'no provodyashchikh polostey / A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 11. S. 37-40.
9. Rokhlin V. Rapid solution of integral equation of scattering theory in two dimensions / V.Rokhlin // J. Comput. Phys., Vol. 86, 414-439, Feb. 1990.
10. Coifman, R. Wandzura The fast multipole method for the wave equation: A pedestrian prescription / R.Coifman, V. Rokhlin, S. Wandzura // IEEE Antennas Propagat. Mag., Vol. 35, 7-12, June 1993.
11. Lu C. C. A multilevel algorithm for solving boundary integral equations of wave scattering / C. C.Lu and W. C. Chew// Microwave Opt. Tech. Lett., Vol. 7, No. 10, 466-470, July 1994.
12. J. M.Song and W. C. Chew Multilevel fast-multipole algorithm for solving combined field integral equations of electromagnetic scattering / J. M.Song W. C. Chew // Microwave Opt. Tech. Lett., Vol. 10, No. 1, 14-19, Sept. 1995.
13. Song, J. M. Multilevel fast multipole algorithm for electromagnetic scattering by large complex objects / J. M.Song , C. C. Lu, d W. C. Chew// IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 45, No. 10, 1488-1493, Oct. 1997.
14. Sarkar T. K. Application of FFT and the conjugate gradient method for the solution of electromagnetic radiation from electrically large and small

- conducting bodies / T. K.Sarkar , E. Arvas, S. M. Rao // IEEE Trans. Antennas Propagat., Vol. 34, No. 5, 635-640, May 1986.
15. Preobrazhenskiy A.P. Prognozirovaniye radiolokatsionnykh kharakteristik ideal'no provodyashchey polosti v diapazone dlin voln /A.P.Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2005. № 12. S. 29-31.
 16. L'vovich I.Ya. Razrabotka informatsionnogo i programmnoy obespecheniya SAPR difraktsionnykh struktur i radiolokatsionnykh antenn / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. T. 2. № 12. S. 63-68.
 17. Kanavin S. V. Perspektivy primeneniya sistem mobil'nogo shirokopolosnogo dostupa v setyakh podvizhnoy radiosvyazi na osnove standartov mobile WIMAX i LTE / S. V. Kanavin, A. S. Luk'yanov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. № 1. S. 79-82.
 18. L'vovich I.Ya. Programmnyy kompleks dlya avtomatizirovannogo analiza kharakteristik rasseyaniya ob"ektov s primeneniem matematicheskikh modeley / I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, R.P.Yurov, O.N.Choporov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2006. T. 24. № 2. S. 96-98.
 19. Preobrazhenskiy A.P. Algoritm rascheta radiolokatsionnykh kharakteristik polostey s ispol'zovaniem priblizhennoy modeli / A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2005. T. 21. № 4. S. 17-19.
 20. Preobrazhenskiy A.P. Issledovanie vozmozhnosti opredeleniya formy ob"ekta v okrestnosti vosstanovleniya lokal'nykh otrazhateley na poverkhnosti ob"ektov po ikh diagrammam obratnogo rasseyaniya / A.P. Preobrazhenskiy // Telekommunikatsii. 2003. № 4. S. 29-32.
 21. Lvovich Y.Y. The use of "ant" algorithm in constructing models of objects that have maximum average values of the scattering characteristics / Y.Y.Lvovich, I.Y.Lvovich, A.P.Preobrazhenskiy, O.N.Choporov // Life Science Journal. 2014. T. 12. № 12. S. 463.
 22. Vasil'ev E.M. Evolyutsionnye algoritmy s matrichnoy replikatsiey / E.M.Vasil'ev, I.V.Krutsikh // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011. T. 7. № 2. S. 21-23.
 23. Podval'nyy S.L. Evolyutsionnye printsipy postroeniya intellektual'nykh sistem mnogoal'ternativnogo upravleniya / S.L.Podval'nyy, E.M.Vasil'ev // Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii. 2014. T. 57. № 3. S. 4-8.
 24. Tkalich S.A. Osnovaniya i vozmozhnosti ispol'zovaniya iskusstvennykh neyrosetey v sistemakh prognozirovaniya / S.A.Tkalich, E.M.Vasil'ev // Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. 2008. № 2. S. 37-38.
 25. Vasil'ev E.M. Mnogoal'ternativnoe upravlenie v khaoticheskikh sistemakh svyazi / E.M. Vasil'ev // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2012. T. 8. № 11. S. 155-158.