

УДК 621.396

Т.В. Глотова

ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ОБЪЕКТОВ НАД ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Воронежский институт высоких технологий

Рассматривается итеративный гибридный метод, сочетающий аппроксимацию Кирхгофа и многоуровневый быстрый мультипольный алгоритм (MLFMA) для моделирования электромагнитного рассеяния от трехмерных (3-D) объектов над двумерной (2-D) случайной диэлектрической шероховатой поверхностью. Предложены некоторые способы ускорения вычислений. Во-первых, для ускорения вычисления электромагнитного поля в дальней зоне используется аппроксимация (FAFFA) процесса взаимодействия между шероховатой поверхностью и объектом. Во-вторых, опираясь на механизм рассеяния над шероховатой поверхностью, выведено правило для умеренно шероховатой поверхности для бистатического рассеяния, которое может в дальнейшем снизить число итераций при моделировании. По сравнению с традиционными методами, в рамках гибридного метода появляются возможности для анализа рассеяния 3-D объекта, лежащего над случайными шероховатыми поверхностями.

Ключевые слова: рассеяние электромагнитных волн, гибридный метод, моделирование, шероховатая поверхность.

Исследования электромагнитного (ЭМ) рассеяния на композитных трехмерных моделях (3-D) объектов над двухмерными (2-D) шероховатыми поверхностями вызывает большой интерес в последние годы. Это типичная проблема при изучении характеристик рассеяния в подобных задачах, которые могут использоваться при моделировании таких объектов, как корабли на море, танки на земле, и др. При этом некоторые предыдущие исследования были сосредоточены на модели полупространства Функции Грина [1], что снижало точность решения задач. При изучении рассеяния электромагнитных волн на композитной трехмерной (3-D) модели объекта над двухмерной (2-D) шероховатой поверхностью необходимо учитывать взаимодействие между элементами объекта.

К настоящему времени многочисленные методы были рассмотрены при решении задач, связанных с рассеянием на композитных моделях [2-4]. В [5], итерационный численный алгоритм был применен, чтобы рассчитать рассеяние на составной модели, где специальный алгоритм использовался для того, чтобы проиллюстрировать механизм взаимодействия между интересующими объектами и шероховатой поверхностью среды. На основе модели, Йе Чжин [9] представил аналитико-численный гибридный алгоритм для 2-D объекта, лежащего выше 2-D шероховатой поверхности, и еще им были даны предложения по

уменьшению времени расчетов. На основе этого разработанного алгоритма могут решаться и задачи рассеяния 2-D шероховатой поверхностью. Но трудно эффективно решать проблему 2-D шероховатой поверхности вследствие долгого времени расчета. В недавних работах асимптотический метод [7,8] был введен для расчета рассеяния в 3-D композитных моделях.

Асимптотический метод может дать хорошие результаты в определенных случаях, если эффекты влияния многократного рассеяния были учтены. Но он может хорошо работать только тогда, когда объект не имеет сложной структуры. В [9], использовался подход FDTD, причем был разработан распараллеленный алгоритм решения задачи, связанный с изучением механизма рассеяния электромагнитных волн на 3-D композитных моделях.

В данной работе вводится гибридный итерационный метод для анализа композитной модели 3-D объекта над 2-D шероховатой поверхностью. Применяется аппроксимация Кирхгофа [3] и многоуровневый быстрый мультипольный алгоритм (MLFMA) [4]. Приближение Кирхгофа широко применяется для вычисления рассеяния на шероховатой поверхности, поскольку наведенный ток распределения может быть легко получен путем использования приближения физической оптики с очень низкими вычислительными затратами. Как строгий метод, MLFMA был применен для расчета рассеяния объектов с произвольным очертанием. Это уменьшает вычислительные затраты на $O(N \log N)$ (N -количество неизвестных) вместо, $O(N^2)$ метода моментов [2].

Поэтому, мы совместили преимущества приближения Кирхгофа и MLFMA в гибридном методе. Для того, чтобы сделать его более эффективным, для 2-D усеченной шероховатой поверхности мы рассматривали для случая бистатического рассеяния на шероховатой поверхности.

Далее мы рассмотрим модель рассеяния электромагнитной волны для 3-D объекта, расположенного над 2-D случайной диэлектрической шероховатой поверхностью. При этом применяется изотропный гауссовский спектр [5] для имитации шероховатой поверхности. В грубом приближении высота поверхности обозначается как $h(x, y)$. Подразумевается, что $\langle h(x, y) \rangle = 0$. В соотношении длин LX и LY в направлениях X и Y принимаются равными быть $LX = LY = LC$.

Рисунки 1 и 2 демонстрируют, как работает модель рассеяния [5, 6]. Есть несколько волн, E_i -это падающая волна, освещающая объект, которая дает рассеянное поле, вторая волна – это E_r , освещающая шероховатую поверхность, которая дает рассеянное поле, 3-я волна связана с распределением тока, который индуцирует E_s , что дает взаимное распределение полей, 4-я волна является текущим

распределением по шероховатой поверхности, вызванная взаимным рассеянным полем.

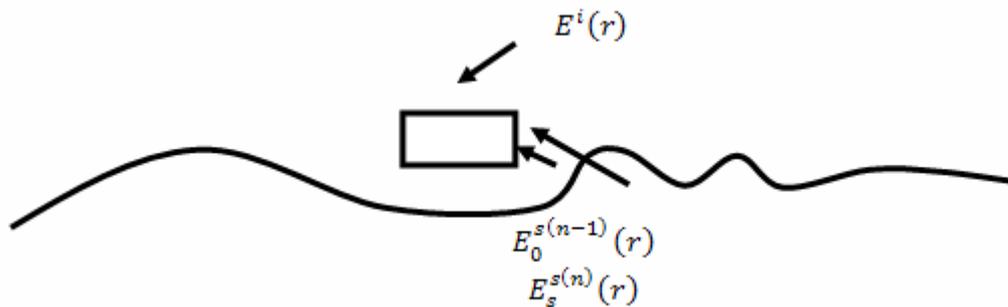


Рисунок 1

Рассеяние на составной модели решается итеративным процессом. Взаимодействие между объектом и шероховатой поверхностью приходилось путем обновления возбуждения полей

$$E_s^{i(n)}(r) = E^i(r) + E_0^{s(n-1)}(r), \quad (1)$$

$$E_0^{i(n+1)}(r) = E^i(r) + E_s^{s(n)}(r). \quad (2)$$

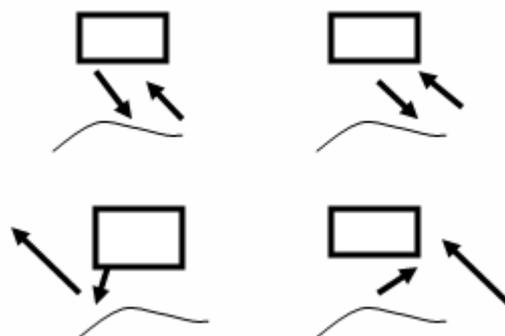


Рисунок 2

Записывается интегральное уравнение Фредгольма второго рода для электрического тока [1] с учетом граничных условий на поверхности идеально проводящей (Рисунок 2)

$$J_s(r) = 2n \times H^i(r) + \frac{1}{2\pi} n \times \int_s J_s(r) \times \text{grad}' G ds', \quad (3)$$

где $G = \exp(-jkr)/r$ – трехмерная функция Грина для свободного пространства, являющаяся решением трехмерного уравнения Гельмгольца при δ -образном источнике [1]; s – поверхность объекта; n – внешняя нормаль к поверхности структуры в точке наблюдения;

$J_s = [n \times H]$ – поверхностная плотность эквивалентного электрического тока; $H^i(r) = \mathbf{x}H_x^i + \mathbf{y}H_y^i + \mathbf{z}H_z^i$ – вектор падающей плоской вертикально поляризованной ЭМВ.

В результате этого интегральное уравнение (3) дискретизируется и приводится к СЛАУ:

$$\begin{bmatrix} U_{xx} & U_{xy} & U_{xz} \\ U_{yx} & U_{yy} & U_{yz} \\ U_{zx} & U_{zy} & U_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix}, \quad (4)$$

здесь J_x, J_y, J_z – компоненты плотности поверхностного электрического тока.

В приведенной выше СЛАУ блоки в матрице U вычисляются следующим образом [4]:

$$\begin{aligned} (U_{xx})_{mn} &= \frac{1}{2\pi_s} \int ((n_y)_m (\text{grad}'_y)_{mn} + (n_z)_m (\text{grad}'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \\ (U_{xy})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_s} \int (n_y)_m (\text{grad}'_x)_{mn} ds'_n; \\ (U_{xz})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_s} \int (n_z)_m (\text{grad}'_x)_{mn} ds'_n; \\ (U_{yx})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_s} \int (n_x)_m (\text{grad}'_y)_{mn} ds'_n; \\ (U_{yz})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_s} \int (n_z)_m (\text{grad}'_y)_{mn} ds'_n; \\ (U_{yy})_{mn} &= \frac{1}{2\pi_s} \int ((n_x)_m (\text{grad}'_x)_{mn} + (n_z)_m (\text{grad}'_z)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} (U_{zx})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_S} \int_S (n_x)_m (grad'_z)_{mn} ds'_n; \\ (U_{zy})_{mn} &= -\frac{1}{2\pi_S} \int_S (n_y)_m (grad'_z)_{mn} ds'_n; \\ (U_{zz})_{mn} &= \frac{1}{2\pi_S} \int_S ((n_x)_m (grad'_x)_{mn} + (n_y)_m (grad'_y)_{mn}) ds'_n - \delta_{mn}, \end{aligned}$$

где $m, n = 1, \dots, N$, где N – число точек дискретизации поверхности полости.

Здесь δ_{mn} – символ Кронекера,

$$\begin{aligned} grad G_{mn} &= -\hat{r}_{mn} \frac{1 + jkr}{r_{mn}^2} \exp(-jkr_{mn}) = \\ &= \mathbf{i}(grad'_x)_{mn} + \mathbf{j}(grad'_y)_{mn} + k(grad'_z)_{mn}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\hat{r}_{mn} = \frac{\mathbf{r}_{mn}}{|\mathbf{r}_{mn}|}$ – единичный вектор, направленный из точки источника в точку наблюдения [1].

В (5) интегрирование по поверхности S идет по поверхностям, на которых идет рассеяние электромагнитной волны.

Вектор-столбец свободных членов:

$$\begin{aligned} (R_x)_m &= 2((n_y)_m (H_z^i)_m - (n_z)_m (H_y^i)_m); \\ (R_y)_m &= -2((n_x)_m (H_z^i)_m - (n_z)_m (H_x^i)_m); \\ (R_z)_m &= 2((n_x)_m (H_y^i)_m - (n_y)_m (H_x^i)_m). \end{aligned} \quad (7)$$

После решения приведенной СЛАУ (5) вычисляется рассеянное электромагнитное поле в дальней зоне, связанное с найденным электрическим током $J_S(r)$ следующим образом [1]:

$$\mathbf{H}^{sc}(\mathbf{r}) = \frac{j\omega\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \exp(-jkr)}{4\pi r} \int_S \mathbf{J}_S(\mathbf{r}') \times \hat{\mathbf{r}} \exp(j\mathbf{k}\hat{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{r}') ds', \quad (8)$$

где k – волновое число;

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – магнитная и электрическая постоянная;

\mathbf{r}' – радиус-вектор точки источника;

\mathbf{r} – радиус-вектор точки наблюдения в дальней зоне.

Случайная поверхность представлялась распределенной по гауссовому закону. На Рисунок 3 приведена рассчитанная мощность рассеянного поля. Видно, что максимум мощности вторичного рассеянного электромагнитного поля соответствует углам наблюдения $-60^\circ < \theta < 15^\circ$. Кривая 1 соответствует расчетам на основе метода интегральных уравнений, кривая 2 соответствует расчетам на основе гибридного метода. За счет изменения расположения объектов над шероховатой поверхностью можно проводить управление рассеянным электромагнитным полем.

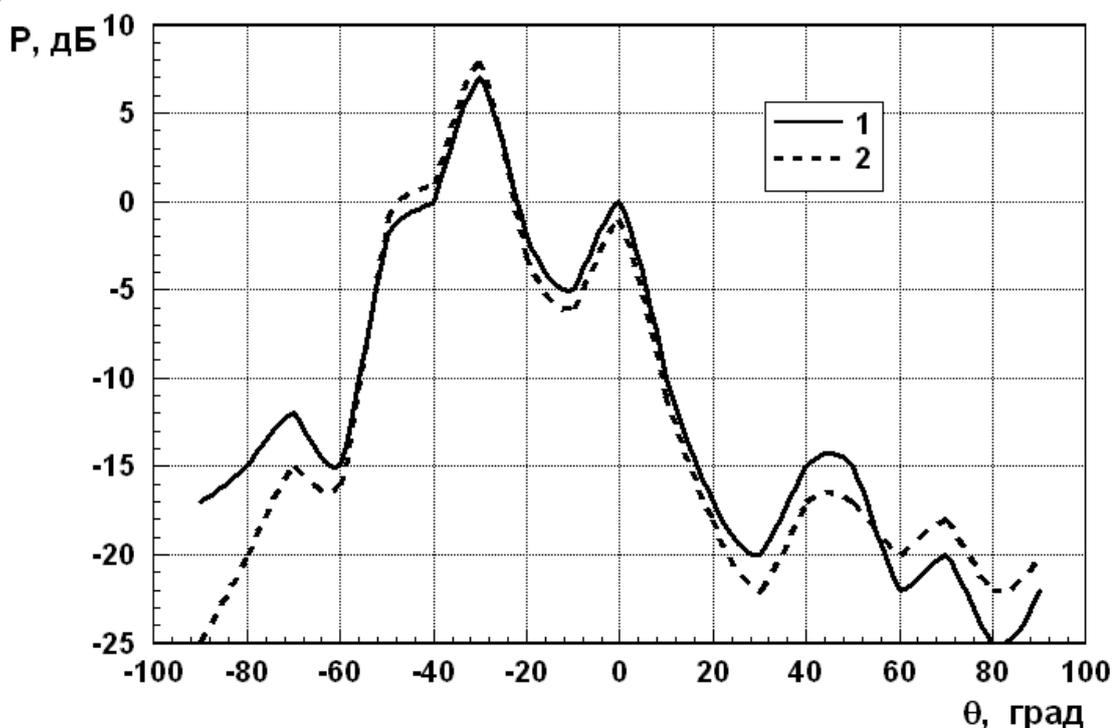


Рисунок 3

Вывод. На основе гибридного подхода проведено моделирование рассеяния сложного объекта над шероховатой поверхностью. Показана эффективность предлагаемого гибридного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Преображенский А.П. Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн / А.П.Преображенский / Воронеж, "Научная книга", 2007, 248 с.
2. Косилов А.Т. Методы расчета радиолокационных характеристик объектов / А.Т.Косилов, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 68-71.

3. Головинов С.О. Цифровая обработка сигналов / С.О.Головинов, С.Г.Миронченко, Е.В.Щепилов, А.П.Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2009. № 4. С. 064-065.
4. Преображенский А.П. Аппроксимация характеристик рассеяния электромагнитных волн элементов, входящих в состав объектов сложной формы / А.П.Преображенский, Ю.П.Хухрянский // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2005. Т. 1. № 8. С. 15-16.
5. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / О.В.Милошенко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.
6. Преображенский А.П. САПР современных радиоэлектронных устройств и систем / А.П.Преображенский, Р.П.Юров // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2006. Т. 2. № 3. С. 35-37.
7. 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.
8. 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.
9. Болучевская О.А. Свойства методов оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн / О.А.Болучевская, О.Н.Горбенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 3. С. 4.

T.V. Glotova

**A HYBRID METHOD FOR CALCULATION OF SCATTERING
CHARACTERISTICS OF OBJECTS ABOVE A ROUGH SURFACE**

Voronezh Institute of High Technologies

An iterative hybrid method is considered combining the Kirchhoff approximation and the multilevel fast multipole algorithm (MLFMA) is studied for electromagnetic scattering from three-dimensional (3-D) object above a two-dimensional (2-D) random dielectric rough surface. In order to reduce computational costs, some types of speed calculations were used. First, it is used to speed up calculations of electromagnetic field in far field approximation (FAFFA) of the process of interaction between the rough surface and the object. Secondly, based on the mechanism of scattering on a rough surface, and derived a rule for moderately rough surface bistatic scattering, which can further increase the speed of iteration. Compared with traditional methods, a hybrid the method of procedure is sufficient for analysis scattering of 3-D object above random rough surfaces.

Keywords: scattering of electromagnetic waves, method, hybrid method, modelling, rough surface.