

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ
СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ
РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ**

К. С. Курочка, Ю. А. Сидоракина

*Гомельский технический университет им. П. О. Сухого, Бела-
русь*

Моделирование распределения электромагнитных полей в ближней зоне сферической частицы методом конечных разностей во временной области (*FDTD – Finite Difference Time Domain*) состоит из следующих этапов: создание физической модели и определение свойств материальных объектов, использованных в ней; настройка параметров электромагнитного моделирования (на этом этапе определяется область моделирования и граничные условия); выполнение электромагнитного моделирования; вычисление результатов; последующая обработка и визуализация полученных результатов.

Метод *FDTD* один из многочисленных методов решения дифференциальных уравнений. Метод *FDTD* является популярным методом численного решения задач, доказавшим свою универсальность и надёжность, оставаясь относительно простым для практической реализации.

FDTD метод использует центральную разностную аппроксимацию для дискретизации уравнений Максвелла, а именно законы Фарадея и Ампера во временной и пространственной областях, а затем решает полученные уравнения численно для получения распределения электрического и магнитного поля на каждом временном шаге используя явную схему. Полученное решение метода *FDTD*, имеет второй порядок точности и является стабильным, если выбираемый шаг по времени удовлетворяет определенному условию [1, 2].

В счетном объеме каждый вектор электрического (E) или магнитного (H) поля вычисляется через 4 соседних вектора. Так происходит по всему объему [3]. Но на границах самые последние векторы E имеют: на гранях параллелепипеда счетного объема только три соседних вектора H из четырех необходимых; на ребрах – два. Поэтому точно вычислить поле E на границах невозможно. Проблема вычисления граничных полей решается при помощи идеально сочетающихся слоев *PML (Perfectly Matched Layer)*.

Алгоритм расчёта методом конечных разностей во временной области построен следующим образом: задается счетная область, разрешение сетки и граничные условия (при моделировании программного комплекса граничные условия представлены в виде поглощающих граничных условий (*PML*)); внутри счетной области помещается сферическая частица с заданными свойствами (задаются относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости); задается источник (для генерации плоской волны более удобен тип источника, реализуемый с помощью метода полного и рассеянного поля); источник генерирует конечную во времени плоскую волну, спектральный состав которой должен покрывать интересующий диапазон частот, далее, волна попадает на частицу и перерассеивается на ней и, при наличии поглощающих граничных условий, через какое-то время уходит из счетной области (моменты распространения волны сохраняются).

Объект, рассматриваемый при решении задачи, представляет собой частицу сферической формы. Таким образом, модель частицы можно представить в виде сферы. На поверхности сферы с выбранным шагом по осям Ox , Oy и Oz строятся узлы с равным шагом по каждой из осей. Внешнее воздействие на частицу представлено плоской волной. Волна при моделировании физической системы изображается синусоидальной функцией. При воздействии волны вблизи поверхности частицы возникает электромагнитное поле. Часть энергии электромагнитного поля проникает в среду и остается в ней в виде кинетической энергии частиц. Помимо этого возбужденные элементарные заряды могут преобразовать часть падающей электромагнитной энергии в другие виды.

Уравнения Максвелла в явной форме (1-6) образуют основу алгоритма *FDTD* для моделирования взаимодействия электромагнитных волн с произвольными трехмерными объектами, внедренными в произвольные среды под действием заданного источника. Данные уравнения представлены ниже:

$$\begin{aligned}
 H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) &= \frac{\mu_x - 0.5\Delta\sigma_{Mx}}{\mu_x + 0.5\Delta\sigma_{Mx}} H_x^{n-1/2}(i, j+1/2, k+1/2) + \\
 &+ \frac{\Delta t}{\mu_x + 0.5\Delta\sigma_{Mx}} \left[\frac{E_y^n(i, j+1/2, k+1) - E_y^n(i, j+1/2, k)}{\Delta z} - \frac{E_z^n(i, j+1/2, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2)}{\Delta y} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) = \frac{\mu_y - 0.5\Delta t \sigma_{My}}{\mu_y + 0.5\Delta t \sigma_{My}} H_y^{n-1/2}(i+1/2, j, k+1/2) + \frac{\Delta t}{\mu_y + 0.5\Delta t \sigma_{My}} \left[\frac{E_z^n(i+1, j, k+1/2) - E_z^n(i, j, k+1/2)}{\Delta x} - \frac{E_x^n(i+1/2, j, k+1) - E_x^n(i+1/2, j, k)}{\Delta z} \right]; \quad (2)$$

$$H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) = \frac{\mu_z - 0.5\Delta t \sigma_{Mz}}{\mu_z + 0.5\Delta t \sigma_{Mz}} H_z^{n-1/2}(i+1/2, j+1/2, k) + \frac{\Delta t}{\mu_z + 0.5\Delta t \sigma_{Mz}} \left[\frac{E_x^n(i+1/2, j+1, k) - E_x^n(i+1/2, j, k)}{\Delta y} - \frac{E_y^n(i+1, j+1/2, k) - E_y^n(i, j+1/2, k)}{\Delta x} \right]; \quad (3)$$

$$E_x^{n+1}(i+1/2, j, k) = \frac{\varepsilon_x - 0.5\Delta t \sigma_x}{\varepsilon_x + 0.5\Delta t \sigma_x} E_x^n(i+1/2, j, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_x + 0.5\Delta t \sigma_x} \left[\frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i+1/2, j-1/2, k)}{\Delta y} - \frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k-1/2)}{\Delta z} \right]; \quad (4)$$

$$E_y^{n+1}(i, j+1/2, k) = \frac{\varepsilon_y - 0.5\Delta t \sigma_y}{\varepsilon_y + 0.5\Delta t \sigma_y} E_y^n(i, j+1/2, k) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_y + 0.5\Delta t \sigma_y} \left[\frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k-1/2)}{\Delta z} - \frac{H_z^{n+1/2}(i+1/2, j+1/2, k) - H_z^{n+1/2}(i-1/2, j+1/2, k)}{\Delta x} \right]; \quad (5)$$

$$E_z^{n+1}(i, j, k+1/2) = \frac{\varepsilon_z - 0.5\Delta t \sigma_z}{\varepsilon_z + 0.5\Delta t \sigma_z} E_z^n(i, j, k+1/2) + \frac{\Delta t}{\varepsilon_z + 0.5\Delta t \sigma_z} \left[\frac{H_y^{n+1/2}(i+1/2, j, k+1/2) - H_y^{n+1/2}(i-1/2, j, k+1/2)}{\Delta x} - \frac{H_x^{n+1/2}(i, j+1/2, k+1/2) - H_x^{n+1/2}(i, j-1/2, k+1/2)}{\Delta y} \right]; \quad (6)$$

В результате было разработано ПО, реализующее моделирование данной задачи.

Литература

1. Wenhua, Y. Advanced FDTD Methods [Text] / Y. Wenhua – Artech hous, 2011. – 254 p.
2. Компьютерное моделирование распределения электромагнитного поля вблизи сферических частиц с использованием векторного метода конечных элементов статья Современные информационные компьютерные технологии mcIT-2013: материалы III Международной научно-практической конференции [Электронный ресурс] / УО «Гр. ун-т им. Я. Купаль». – Гродно, 2013. – 1 электр. компакт диск (CD-R). – 792 с. – Рус. – Деп. в ГУ «БелИСА» 19.09.13 г., № Д201315. 5 стр. Кухаренко А.А
3. Алехнович, В.И., Математическое моделирование процесса рассеяния электромагнитного излучения на проводящих диэлектрических телах сложной формы [Текст] / В.И. Алехнович, К.И. Зайцев, В.Е. Карасик. – Москва: МГТУ, 2012. – 54 с.

УДК 338.27

МЕТОД КОВЗНОГО ДВОБІЧНОГО ЕКСПОНЕНЦІЙНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Братусь О. В.*, Подладчіков В. М.*, Подладчікова Т. В.**

**Навчально-науковий комплекс «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут», Україна*

***Сколковський інститут науки і технологій*

Алгоритми оптимальної фільтрації не дозволяють розв'язати ряд задач, що становлять особливий клас. Сюди, наприклад, відносяться задачі з обробки даних про сонячну активність, задачі океанографічних досліджень, зокрема, визначення координат окремих областей морського дна, мілин, впадин. Такі задачі характеризуються певними особливостями, які дозволяють інтерпретувати їх як задачі з уточнення минулих по відношенню до теперішнього моменту часу параметрів. Ці задачі можуть вирішуватися методом згладжування. Відновлення істинних прихованих закономірностей динамічних процесів є актуальною задачею при обробці експериментальних даних, наприклад, при роботі з даними, що описують сонячну активність, такими, як числа Вольфа. Побудова моделі за даними, що описують сонячну активність, є складною задачею, оскільки об'єм даних є обмеженим та фізичні процеси, що відбуваються на Сонці, є недостатньо вивченими. Аналіз спостережених даних показує, що