

**Богач И.В., Кравець А.Ю.**

Винницкий национальный технический университет

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕСТИРОВАНИЯ WEB-СТРАНИЦ С ПОМОЩЬЮ ДРАЙВЕРА БРАУЗЕРА SELENIUM WEBDRIVER

### Аннотация

В данной работе приведены основные понятия автоматизированного тестирования. Выделены общие этапы тестирования, и основные этапы быстрого тестирования web-сайта. Были определены основные преимущества работы с Selenium WebDriver, охарактеризованы его пределы работы. Определены перспективы использования данного драйвера браузера, возможны программные стеки для его самого эффективного внедрения.

**Ключевые слова:** тестирование, автоматизированное тестирование, тестовый сценарий, драйвер браузера, Selenium WebDriver, web-сайт.

**Bohach I.V., Kravets A.Yu.**

Vinnitsia National Technical University

## AUTOMATED TESTING OF WEB-PAGES USING DRIVER OF SELENIUM WEBDRIVER

### Summary

This paper presents the basic concepts of automated testing. Common stages of testing and the main stages of rapid web-site testing are specified. The main advantages of working with Selenium WebDriver are identified and its work is characterized. The prospects of the use of the browser software and possible stacks for its most efficient implementation are identified.

**Keywords:** testing, automated testing, test script, driver of browser, Selenium WebDriver, web-site.

УДК 004.942

## МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ СТРУКТУР МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ РІЗНИЦЬ У ЧАСОВОМУ ПРОСТОРИ

**Довгалець С.М., Малишевський О.М.**

Вінницький національний технічний університет

В даній роботі розглянуто один з найпопулярніших методів чисельного вирішення електродинамічних задач FDTD, що вирішує електричні і магнітні поля в тимчасових і просторових доменах та дозволяє будь-яку геометрію моделі і не накладає ніяких обмежень на властивості матеріалу. Розглянуто теоретичні відомості рівнянь електромагнітних полів, визначення значень при поширенні хвиль та проблеми отримання значень при граничних умовах. Запропонований метод моделювання криволінійних поверхонь розділу середовищ дозволяє моделювати поверхневі електромагнітні та плазмонні коливання без додаткових утрат точності.

**Ключові слова:** метод кінцевих різниць у часовому просторі, комірка Yee, електромагнітне поле, граничні умови, моделювання довільної поверхності.

**Постановка проблеми.** В задачах електродинаміки актуальним питанням є моделювання. Найбільш ефективним методом розрахунку математичних моделей є метод кінцевих різниць, але він вимагає значну кількість системних ресурсів. Тому для розрахунку рівнянь Максвелла у диференціальній формі використовується метод кінцевих різниць у часовому просторі (англ. Finite Difference Time Domain, FDTD), що дозволяє значно зменшити використання ресурсів комп'ютера. Він може бути з успіхом застосований для моделювання наддовгих електромагнітних хвиль в геофізиці і мікрохвиль, вирішення завдань в оптичному діапазоні (фотонні кристали, наноплазмоніка, солітони і біофотоніки). Особливо ефективним є застосування методу FDTD в тих завданнях, в яких пасують традиційні підходи, зокрема – де важлива можливість аналізу нестационарних процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У виданні [1] викладені основні положення методу кінцевих різниць у часовому просторі та перспективні напрямки його використання. У роботі [2] було розроблено техніку, що реалізує явну різницеву схему другого порядку для вирішення вихрових рівнянь Максвелла у просторі та часі. Також у виданні [3] було розглянуто межі використання двохвимірною моделювання за допомогою FDTD.

**Мета роботи.** Метою роботи є розробка методики для отримання числових рішень проходження процесів поширення хвиль розв'язанням диференціальних рівнянь методом FDTD.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Створення пристроїв, які використовують поверхневі плазмон – поляритонні хвилі на поверхні металу для переносу інформації, вимірювання та локальної взаємодії із речовиною потребує методів чисельної електродинаміки, які враховують метал

як дисперсійне середовище із втратами та якісно моделюють поверхні (межі розділу середовищ) довільної форми. Використання цих методів дозволяє оцінювати конструкції пристроїв і визначати їхні оптимальні параметри та режими роботи до їхнього виготовлення.

Метод кінцевих різниць в часовому просторі (FDTD) ґрунтується на дискретизації рівнянь Максвелла, записаних в диференціальній формі.

У рівняннях Максвелла зміна електричного поля  $E$  (частинна похідна) залежить від розподілу в просторі магнітного поля  $H$  (ротор). Аналогічно, зміна поля  $H$  залежить від розподілу в просторі поля  $E$ . На цьому спостереженні заснований алгоритм методу. Сітки для полів  $E$  і  $H$  зміщені по відношенню один до одного на половину кроку дискретизації часу і по кожній із просторових змінних. Кінцево-різницеві рівняння дозволяють визначити поля  $E$  і  $H$  на даному часовому кроці на підставі відомих значень полів на попередньому.

Цей метод дозволяє легко враховувати додаткові диференційні співвідношення для нелінійних середовищ. Збіжність та ізотропність методу досягається при використанні комірки  $Yee$  (рисунк 1) в якості елементарної комірки сітки розбиття. Комірка  $Yee$  являє собою елементарний об'єм, обмежений елементарними контурами інтегрування для знаходження циркуляції електричного (у випадку електричної підґратки) або магнітного (у випадку магнітної підґратки) поля [2].

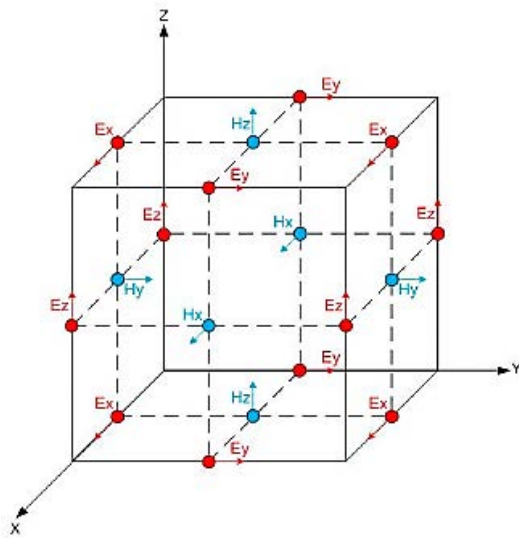


Рис. 1. Комірка Yee

Електрична та магнітна підґратки зміщені одна відносно одної на вектор  $\left\{\frac{\Delta x}{2}, \frac{\Delta y}{2}, \frac{\Delta z}{2}\right\}$  (рисунк 2). На цьому рисунку проілюстровано взаємне розташування електричної та магнітної підґраток, де виділено контури для визначення циркуляції електричного поля в напрямку осі  $z$  та циркуляції магнітного поля в напрямку осі  $x$ .

Особливість підходу Yee полягає у просторовому рознесенні точок, в яких розраховуються різні компоненти векторних полів [2]. Це означає, що кожна із компонент електричного та магнітного полів має власну сітку розбиття, просторово зміщену відносно інших на величину, вдвічі меншу за крок дискретизації. Таке рознесення призводить до того, що для визначення повного вектора електричного чи магнітного поля в певному вузлі сітки розбиття необхідно використовувати компоненти, які визна-

чені в різних просторових точках. На цю особливість можна не зважати, коли розрахунок проводиться для однорідного середовища. Однак, при моделюванні неоднорідних середовищ чи границь розділу середовищ визначення повних векторів електричного та магнітного полів відбувається із додатковою похибкою через те, що різні компоненти одного вектора визначаються в різних середовищах.

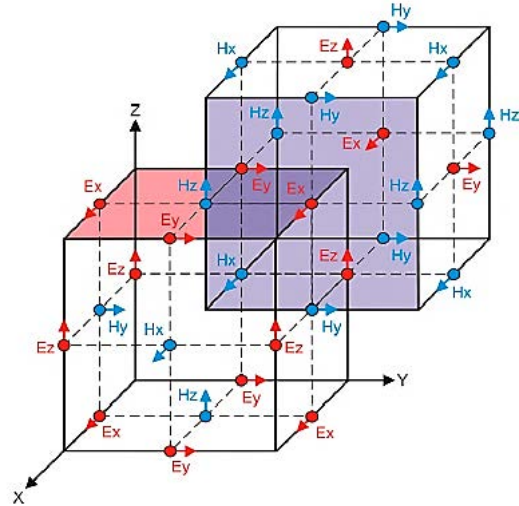


Рис. 2. Зчеплення електричної та магнітної комірок Yee

Прості умови поглинання (ABC).

Для умов поглинання значення векторів електричного поля на кордоні обчислюються на підставі відомих полів у прикордонних шарах. Причому беруться прикордонні поля не тільки на поточному кроці по часу, але і на попередніх кроках.

У літературних джерелах зустрічається опис цілої низки простих умов поглинання різних авторів. Практично найчастіше застосовують умови Мура (Mur) і Ляо (Liao). Решта не застосовують або використовують дуже рідко через їх більш низький ефективності (Trefethen-Halpern, Higdon) або незручності у використанні (Retarded Time – RT), або через незастосовність в декартових координатах (Bayliss-Turkel), або через тенденції до втрати стабільності (відноситься майже до всіх умов, але особливо – до умов, заснованих на вищих порядках точності кінцевих різниць) [4].

Всі умови мають досить низький коефіцієнт відбиття від межі, що становить порядку 0,1-1%, але тільки при падінні хвилі на межу під прямим кутом. При падінні під гострим кутом коефіцієнт відбиття зростає аж до 100% при падінні по дотичній. Через це межі необхідно розташовувати якомога далі від джерела електромагнітних хвиль, щоб хвилі приходили до межі під якомога більшими кутами, бажано по нормалі до кордону.

Умови PML.

Вони вперше опубліковані в статті [3], а потім отримали розвиток в публікаціях цього автора в 1995-1996 р. При виникненні інтересу до безумовно-стабільних алгоритмів були розроблені умови PML, адаптовані до нових алгоритмів. Умови PML володіють низьким коефіцієнтом відображення (за деякими даними в мільйон разів менше, ніж у умов Мура), а також практично незалежністю від кута падіння хвилі.

До недоліків умов PML слід віднести значно більший обсяг необхідної пам'яті, ніж для умов ABC і наявність нижньої граничної частоти, для зниження якої вимагається збільшення кількості

шарів PML, а, отже, необхідної пам'яті. Як наслідок збільшення необхідного обсягу пам'яті відбуватися зниження швидкості обчислень.

Переваги методу FDTD:

- FDTD – це простий і інтуїтивно зрозумілий метод;
- оскільки FDTD працює в тимчасовій області, він дозволяє отримати результат для широкого спектру довжин хвиль за один розрахунок, що може бути корисним при вирішенні завдань, в яких не відомі резонансні частоти або в разі моделювання широкосмугових сигналів;
- FDTD дозволяє створювати анімовані зображення поширення хвилі в рарозрахунковому полі;
- FDTD зручний при завданні анізотропних, дисперсних і нелінійних середовищ;
- метод дозволяє безпосередньо моделювати ефекти на отворах, так само як ефекти екранування, причому поля всередині і поза екраном можуть бути розраховані як безпосередньо, так і нема.

Недоліки методу FDTD:

- величина кроку дискретизації по простору повинна бути мала в порівнянні зі спектром досліджуваного довжин хвиль і характерним розміром досліджуваної структури, у деяких випадках (інверсні опали з маленькими перегородками між кульками) це може зажадати сіток з великою роздільною здатністю, що означає великі витрати пам'яті і великий час розрахунку;
- FDTD розраховує поля всередині лічильної області. Якщо потрібно знайти поле на великій відстані від джерела, це вимагає збільшення розрахункової області і часу розрахунку. Існують розширення методу для знаходження дальніх полів, але вони вимагають пост обробки [6].

При моделюванні границь розділу середовищ, а особливо поверхневих явищ на цих границях, як то поверхневих плазмонних коливань, визначення повних векторів електричного та магнітного полів із найменшою похибкою є однією із головних проблем. Як зазначено вище, комірка  $Y_{ee}$  має вади, що призводять до додаткових спотворень повних векторів електричного та магнітного полів на границі розділу середовищ. Тому пропонується використовувати іншу будову сітки розбиття та елементарної комірки, які дозволяють моделювати вектори напруженості електричного та магнітного полів без спотворень. Для визначення повних векторів у вузлі сітки необхідно просторово сумістити центри елементарних комірок для визначення циркуляції поля за всіма трьома напрямками, як проілюстровано на рисунку 3а.

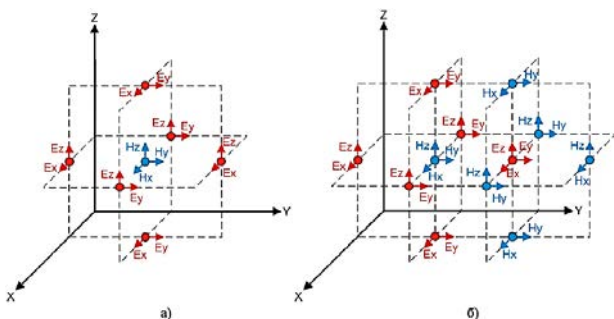


Рис. 3. Взаємне розташування підграток різних компонент електричного і магнітного полів на прикладі елементарних комірок електричної (а) та електричної і магнітної (б) підграток

Запропонована конструкція сітки розбиття моделі дещо ускладнює індексування вузлів елек-

тричної та магнітної підграток. Однак, ця задача вирішується, наприклад, використанням одного тривимірного масиву в оперативній пам'яті для зберігання компонентів і електричного, і магнітного полів [5].

Моделювання 3D-поверхонь довільного нахилу

Спочатку розглянемо випадок, коли елементарна комірка перетинається плоскою границею двох середовищ із довільним нахилом (рисунок 4). Така границя має один вектор нормалі  $n_{\perp}$  по всій поверхні.

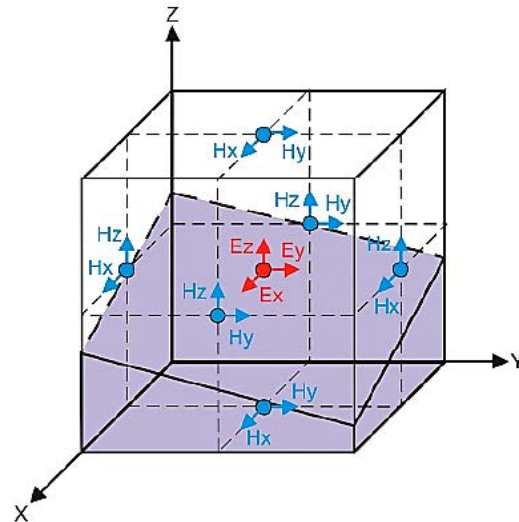


Рис. 4. Ілюстрація випадку, коли об'єм елементарної комірки перетинається плоскою межею розділу двох середовищ із довільним нахилом

У даному випадку необхідно врахувати граничні умови та те, що комірка заповнена лише частково. Подібна задача вже розглядалася, однак ці роботи обмежилися двовимірним випадком при використанні комірки  $Y_{ee}$  в основі сітки розбиття. Тому пропонується використати підхід [7], та розширити його на тривимірний випадок. Для переходу до тривимірного випадку пропонується використовувати коефіцієнти заповнення комірки різними матеріалами моделі, які визначаються як відношення об'єму перетину комірки із деталями моделі до об'єму комірки.

Вибраний підхід оснований на використанні ефективної діелектричної проникності. Ця проникність складається із двох компонент, що виражають граничні умови для паралельної та перпендикулярної до границі розділу компонент електричного поля. Граничні умови для магнітного поля в FDTD-методі враховуються автоматично.

Ефективна діелектрична проникність визначається наступним чином:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_{\parallel}(1 - n^2) + \epsilon_{\perp}n^2 \quad (1)$$

де  $n$  – проекція одиничного вектора нормалі до границі розділу на вектор електричного поля  $E$ .

В наступному виразі  $\epsilon_{\parallel}$  та  $\epsilon_{\perp}$  означають ефективні діелектричні проникності для паралельної та перпендикулярної компонент електричного поля.

Компонента  $\epsilon_{\parallel}$  враховує граничну умову  $E_{\parallel 1} = E_{\parallel 2}$  та часткове заповнення комірки:

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_1 \frac{V_1}{\Delta V} + \epsilon_2 \frac{V_2}{\Delta V} \quad (2)$$

де  $V_1$  та  $V_2$  – об'єми перетину комірки із деталями моделі;  
 $\Delta V$  – об'єм комірки.

Компонента  $\epsilon_{\parallel}$  враховує граничну умову  $D_{\perp 1} = D_{\perp 2}$  та часткове заповнення комірки:

$$\epsilon_{\perp} = \left[ \left( \frac{V_1/\Delta V}{\epsilon_1} \right) + \left( \frac{V_2/\Delta V}{\epsilon_2} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

У випадку, коли один із матеріалів метал, вводиться відповідна діелектрична проникність металу  $\epsilon_m$ , яка визначається за моделлю Дебая, Друде чи Лоренца. При цьому вводиться додаткове диференціальне рівняння [7-8].

**Висновки і перспективи.** Зокрема, за допомогою методу FDTD можливе моделювання оптичних біосенсорів, принцип дії яких ґрунтується на явищі плазмонного резонансу, в якому оптичні властивос-

ті біоматеріалів вимірюються по спектру відбитого променя. Довжина хвилі, при якій відсутнє відбиття променя, і визначає оптичні властивості речовини.

Для однорідних металічних шарів, в яких і проходить резонанс, вже існують відомі моделі та методи розрахунку, а для неоднорідних – використовуються числові методи, і найбільш ефективним з них є метод FDTD.

Використання цього методу дасть можливість розрахунку математичної моделі біосенсорів з неоднорідною плівкою. Принциповою відмінністю таких сенсорів є обрання кута падіння світла на матеріал що значно спростило би проектування автоматизованих вимірювальних пристроїв.

### Список літератури:

1. John B. Schneider Understanding the Finite-Difference Time-Domain Method. – 2011.
2. Yee K. S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media / K. S. Yee / IEEE Trans. Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. 14. – P. 302-307.
3. Mohammadi Ahmad. Contour-Path Effective Permittivities for the Two-Dimensional Finite-Difference Time-Domain Method / A. Mohammadi, H. Nadgaran, M. Agio // Optics express, 2005. – Vol. 13, № 25. – P. 1067-1081.
4. Введение в метод FDTD [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://zfdtd.narod.ru/method/intrfdtd.htm>
5. Kaneda K. FDTD Analysis of Dielectric Resonators with Curved Surfaces / Kaneda K., Houshmand B., Itoh T. // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1997. – Vol. 45. – P. 1645-1649.
6. FDTD (Finite-Difference Time-Domain) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://fdtd.kintechlab.com/ru/fdtd>
7. Deinega A., Valuev I., Potapkin B., Lozovik Y. Minimizing light reflection from dielectric textured surfaces – 2011 [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://fdtd.kintechlab.com/\\_media/deinega\\_thesis.pdf](http://fdtd.kintechlab.com/_media/deinega_thesis.pdf)
8. Deinega A., John S. Solar power conversion efficiency in modulated silicon nanowire photonic crystals – 2012 [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://fdtd.kintechlab.com/deinega\\_solar\\_power\\_conversion\\_efficiency.pdf](http://fdtd.kintechlab.com/deinega_solar_power_conversion_efficiency.pdf)
9. Jalali T. Efficient Effective Permittivity Treatment for the 2D-FDTD Simulation of Photonic Crystals / T. Jalali, K. Rauscher, A. Mohammadi, D. Erni, et al. // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2007. Vol. 4. – P. 644-648.
10. Mohammadi Ahmad, Dispersive Contour-Path Finite-Difference Time-Domain Algorithm for Modeling Surface Plasmon Polaritons at Flat Interfaces / A. Mohammadi, M. Agio // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, № 23. – P. 1330-1338.

**Довгалець С.М., Мальшевський А.Н.**

Винницький національний технічний університет

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СТРУКТУР МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ ВО ВРЕМЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

### Аннотация

В данной работе рассмотрен один из самых популярных методов численного решения электродинамических задач FDTD, решающий электрические и магнитные поля во временных и пространственных доменах и позволяет любую геометрию модели и не накладывает никаких ограничений на свойства материала. Рассмотрены теоретические сведения уравнений электромагнитных полей, определения значений при распространении волн и проблемы получения значений при граничных условиях. Предложенный метод моделирования криволинейных поверхностей раздела сред позволяет моделировать поверхностные электромагнитные и плазмонного колебания без дополнительных потерь точности.

**Ключевые слова:** метод конечных разностей во временном пространстве, ячейка Yee, электромагнитное поле, граничные условия, моделирование произвольной поверхности.

**Dovhalets S.M., Malyshevskiy O.M.**

Vinnitsia National Technical University

## SIMULATION OF OPTICAL STRUCTURE BY FDTD METHOD

### Summary

This paper deals with one of the most popular methods of numerical solution of electromagnetic problems – FDTD, which solves electric and magnetic fields in temporal and spatial domains and allows any geometry of model and imposes no restrictions on the properties of the material. The theoretical equations of electromagnetic information fields, when determining the values of waves and common problems in obtaining values in boundary conditions are studied. The proposed method of modeling curved surfaces between media allows to simulate surface electromagnetic and plasmon oscillations without additional losses of accuracy.

**Keywords:** FDTD, Yee cell, electromagnetic field, boundary conditions, modeling arbitrary surfaces.