

УДК 519.6, 537.87

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОПРОВОЖДАЮЩЕГО ОКНА В МЕТОДЕ BOR-FDTD ДЛЯ РАСЧЁТА ПОВЕДЕНИЯ ПРЕДВЕСТНИКА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ

А.Ю. Бутрым, Е.О. Коломиец, М.Н. Лёгенький

Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

61022, площадь Свободы, 4, Харьков, Украина

e-mail: elkavalenka@yandex.ua

Received 5 May 2012, accepted 22 May 2012

В статье рассматривается численное решение уравнений Максвелла на основе метода конечных разностей во временной области для тел вращения (BOR-FDTD) в открытой области с использованием сопровождающего окна, что позволило провести вычисления для долговременного распространения импульсного предвестника в диэлектрическом волноводе.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод конечных разностей для тел вращения, BOR-FDTD, предвестник, диэлектрический волновод

USING THE ACCOMPANYING WINDOW IN BOR-FDTD METHOD FOR THE CALCULATION OF CONDUCT PRECURSOR IN THE DIELECTRIC WAVEGUIDE

A. Butrym, L. Kolomiets, M. Legenkiy

Kharkiv national university named V.N. Karazin

61022, sq. Svobody, 4, Kharkiv, Ukraine

The paper deals with numerical solution of Maxwell equations by the method of finite differences in the time domain for bodies of revolution (BOR-FDTD) in an open domain using moving frame. The latter made possible to calculate long time propagation of a pulse precursor in a dielectric waveguide.

KEYWORDS: method of finite differences in the time domain for bodies of revolution, BOR-FDTD, precursor, dielectric waveguide

ВИКОРИСТАННЯ СУПРОВОДЖУЮЧОГО ВІКНА В МЕТОДІ BOR-FDTD ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ПОВЕДІНКИ ПЕРЕДВІСНИКА В ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ ХВИЛЕВОДІ

О.Ю. Бутрым, О.О. Коломієць, М.Н. Лєгєнький

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

61022, майдан Свободи, 4, Харків, Україна

У статті розглядається чисельний розв'язок рівнянь Максвелла на основі методу скінченних різниць у часовій області для тіл обертання (BOR-FDTD) у відкритій області з використанням супроводжувачого вікна, що дозволило провести розрахунки для довготривалого поширення імпульсного передвісника у діелектричному хвилеводі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: метод скінченних різниць для тіл обертання, BOR-FDTD, передвісник, діелектричний хвилевід

ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ АКТУАЛЬНОСТЬ

В работе [1] авторами был выявлен эффект распространения импульсной поверхностной волны в диэлектрическом волноводе. Было установлено, что при импульсном возбуждении диэлектрического волновода, возникает импульсная поверхностная волна, распространяющаяся со скоростью света в свободном пространстве и создающая внутри волновода волновую структуру в виде конусов типа излучения Черенкова, переотражающихся между границами волновода под критическим углом. Представляет интерес исследовать эту волну при распространении на достаточно большое расстояние.

Для рассматриваемой задачи использование численных методов во временной области [2,3] наталкивается на сложности, связанные с возрастанием времени вычислений за счёт существенного увеличения области пространства, требующей дискретизации при изучении распространения импульса на значительные расстояния. Так, с увеличением расстояния, проходимого импульсом, размеры области расчёта растут линейно, а время счета увеличивается квадратично. Для преодоления этой трудности был использован подход на основе сопровождающего окна [4,5], который состоит в том, что вычисления производятся не во всём пространстве, занимаемом волной, а только на участке постоянной длины, движущемся вместе с фронтом волны. При этом область расчёта остаётся постоянной по размеру, и время счёта растёт лишь линейно с увеличением проходимого волной расстояния.

Таким образом, целью работы являлось создание вычислительного алгоритма на основе метода BOR-FDTD [1-2] и метода сопровождающего окна [4,5] с использованием поглощающих граничных условий на основе метода PML для ограничения открытой области пространства [3] и моделирование с его помощью долговременного распространения импульсного предвестника в круглом диэлектрическом волноводе.

МЕТОД РАСЧЁТА

В рамках метода BOR-FDTD поля представляются в виде независимых угловых гармоник, что позволяет от трёхмерных уравнений Максвелла перейти к двумерной задаче в цилиндрических координатах ρ, z для

независимых угловых мод. Формулы обновления компонент поля для этого случая могут быть найдены в [2,3].

Для ограничения области вычислений в радиальном направлении, в отличие от используемых в [4,5] поглощающих граничных условий, в работе был использован идеально согласованный поглощающий слой (PML), особенности применения которого в BOR-FDTD и соответствующие расчётные формулы приведены в [3]. Это позволило избежать проблем с нарастанием поля в радиальном направлении, описанных в [4], и связанной с этим необходимости увеличения расчётного объёма в радиальном направлении, чтобы боковые стенки не оказывали существенного влияния на поведение полей в волноводе.

Вычислительная схема BOR-FDTD является условно-стабильной, то есть шаг по времени должен выбираться исходя из условия стабильности [2], иначе схема оказывается нестабильной, и возникают нефизические нарастающие решения. Для согласования шага движения окна с шагом по времени, необходимо использовать $c_0 \Delta t = \Delta z / 2$ (где c_0 - скорость света в свободном пространстве), что обеспечивает стабильную схему для всех возможных угловых гармоник и не приводит к появлению существенной численной дисперсии [2]. При этом после каждых двух временных шагов все поля в расчётной области сдвигаются назад по отношению к направлению распространения волны на одну ячейку. Впереди добавляется ячейка с нулевыми полями, что не должно возмущать решение, так как в эту область волна не могла ещё дойти вследствие конечности скорости распространения электромагнитного поля и в ней может присутствовать только небольшое по амплитуде нефизичное поле, наличие которого обусловлено численной дисперсией конечно-разностной схемы. Поля удаляемой ячейки временно сохраняются для использования при обновлении полей на задней границе на следующем временном шаге.

Здесь в отличие от [4, 5], поглощающие граничные условия использовались только в радиальном направлении, так как задняя граница рассчитывалась с учётом удаляемых ячеек, а на передней добавлялись нулевые значения.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

С помощью предложенного метода была промоделирована структура, изображённая на рис.1. Это круглый диэлектрический волновод с постоянной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 12$ и радиусом a . Внутри диэлектрика возбуждается импульсная волна с помощью кольцевого магнитного тока следующего вида:

$$\hat{J}(\rho, \varphi, z, t) = \vec{\varphi}_0 \exp\left[-\left(\frac{\rho - \rho_0}{0.12a}\right)^2\right] \exp\left[-\left(\frac{t - t_0}{T}\right)^2\right] \cos(\varphi) \delta(z - z_0), \quad (1)$$

$$a = 1,1; \quad r_0 = 0,5a; \quad T = a/(5c); \quad t_0 = 5T.$$

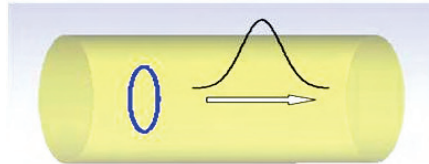


Рис.1. Геометрия задачи.

Размер области вычислений составил 60 ячеек по радиусу (из них 10 ячеек занимает поглощающий слой) и 200 ячеек по длине. Размер ячейки составляет $1/20$ радиуса волновода a , шаг по времени равен $\Delta t = 0,5 \Delta z / c_0$.

На рис.2 представлены распределения продольной составляющей напряженности электрического поля в различные моменты времени. Для наглядности распределение поля показано по обе стороны от оси путём симметричного дублирования расчётной области $0 < \rho < 60 \Delta \rho$ для отрицательных ρ . Поля показаны в последовательные моменты времени с шагом $150 \Delta t$. Белыми стрелками на графиках помечено положение центра излучаемого импульса (1) с учётом запаздывания на распространение в воздухе со скоростью c_0 .

Первые 400 временных шагов, пока волна заполняла вычислительный объём, сдвиг окна не выполнялся, а на левой границе использовались симметричные граничные условия. После 400-го шага началось движение окна со скоростью c_0 , при этом передняя часть волны (предвестник) выглядит как «замороженная», её скелетон (линии соединяющие максимумы двумерного графика [6]) не изменяется, а амплитуда медленно убывает по ходу распространения. Это означает, что предвестник распространяется вдоль волновода со скоростью окна c_0 , теряя энергию за счёт увеличения пространственной протяжённости от переднего фронта поля до фронта волноводной моды, движущейся с замедленной скоростью позади предвестника.

Результаты расчётов с использованием окна сравнивались с результатами, получаемыми при большой неподвижной области расчёта, наблюдались пренебрежимо малые расхождения вблизи переднего фронта

волны, обусловленные отражением численных артефактов, движущихся со скоростью больше скорости света, от передней границы окна, на которой фактически использовались нулевые граничные условия.

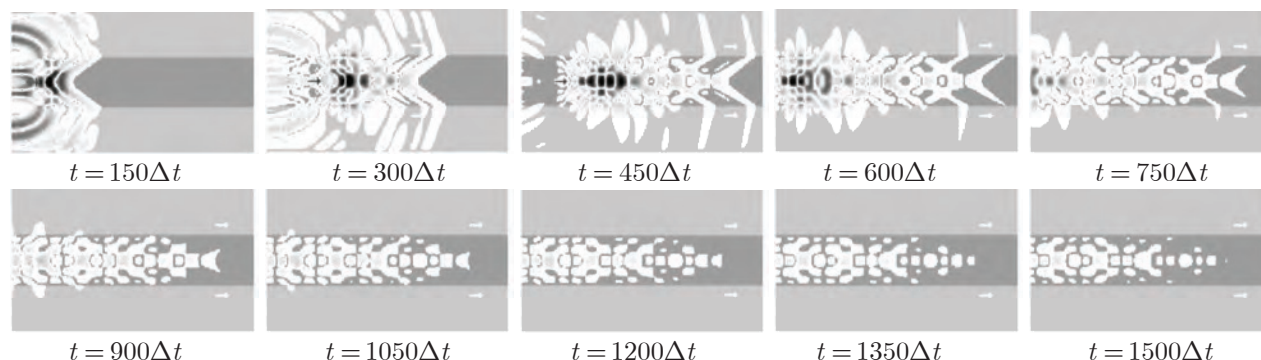


Рис.2. Пространственные распределения E_z в последовательные моменты времени. Тёмно-серым выделена область, занимаемая диэлектриком. Показана вычислительная область размером $200\Delta z$ вдоль волновода и $\pm 60\Delta\rho$ от оси волновода.

ВЫВОДЫ

Предложенный подход позволил провести моделирование распространения импульсной волны в диэлектрическом волноводе на значительное расстояние, при этом время счёта растёт лишь линейно с увеличением проходимого волной пути. Численный эксперимент показал совпадение результатов расчёта в неподвижной системе с расчётом в движущемся окне с пренебрежимо малыми расхождениями на переднем фронте, обусловленными отражением численных артефактов от передней границы, на которой поля дополнялись нулями при вычислении с движущимся окном.

В дальнейшем предполагается использовать предложенный расчётный метод для более тщательного изучения явления распространения импульсного предвестника, в частности необходимо установить закон затухания волны со временем и вдоль волновода, рассмотреть различные формы возбуждающего сигнала, в том числе исследовать распространение цифровых сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Legenkiy M.N., Butrym A.Y., Pulse signals in open circular dielectric waveguide // Progress In Electromagnetics Research Letters. – 2011. - Vol.22. - P.9-17.
2. Allen Taflove A., Hagness S.C.. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method. – Artech House, Inc., (2nd Edition), 2000. – 852 p.
3. Yu W., Mittra R. Parallel Finite-Difference Time-Domain Method, – Artech House, Inc., 2006. – 262 p.
4. Pempfer Y., et al. Moving Coordinate Frame FDTD Analysis of Long Range Tracking of Pulsed Fields in Graded Index Waveguides // Progress In Electromagnetics Research. – 2000. - Vol. 26. - P. 133-164.
5. Li Y., Wang J.. Application of Moving Coordinate FDTD Method on Electromagnetic Pulses Propagation // PIERS Proceedings, Xi'an, China, March 22-26, 2010. – P.192-195.
6. Lazorenko O.V., Chernogor L.F. Sverkhshirokopolosnye signaly i protsessy. Monografiya. – Khar'kov: Khar'kovskiy natsional'nyy universitet imeni V. N. Karazina, 2009. – 576 s.