

## Исследование свойств материалов в прямоугольном волноводе методом FDTD

Е.А. Рябов, И.В. Хайрушев, А.А. Андреев, И.С. Великанов, Б.В. Сергеева

СГУ им. Н.Г. Чернышевского

**Аннотация:** В данной работе демонстрируются результаты численного моделирования в OpenEMS материалов, помещенных в прямоугольный волновод. При различных шагах сетки наблюдается смещение характеристик отражения, что связано с неточностью определения геометрии материала. Сравнение производительности различных компьютеров показывает увеличение скорости выполнения программ при распараллеливании алгоритма FDTD. Также наблюдается уменьшение скорости выполнения программ при распараллеливании на большое количество потоков.

**Ключевые слова:** FDTD, прямоугольный волновод, СВЧ излучение, OpenEMS, коэффициент отражения

### Введение

Исследование распространения электромагнитных волн в пространстве и взаимодействие с различными материалами представляет как фундаментальный интерес, так и открывает широкие прикладные возможности по созданию приборов для управления электромагнитными волнами. Вследствие этого появляется интерес к математическому описанию и моделированию взаимодействия электромагнитных волн с различными материалами. Один из распространенных методов моделирования – метод конечных разностей во временной области (FDTD), широко применяется для моделирования в вычислительной электродинамике и заключается в численном решении уравнений Максвелла путем нахождения приближенного решения на каждом шаге по времени. Данный метод был предложен К.Йи в 1966 году [1] и до сих пор улучшается для удовлетворения нужд исследователей. Существуют различные программные пакеты как коммерческие, так и свободные с открытым исходным кодом, которые имеют различные опции, например в распараллеливании вычисления FDTD. Такие математические пакеты позволяют проводить моделирование сложных структур, состоящих из различных материалов, на больших разностных сетках с требуемой производительностью и точностью. Одним из недостатков метода FDTD является смещение на полшага сетки между электрическими и магнитными полями, приводящее к неточности определения геометрии материалов. Равномерная сетка оригинальной формулировки метода FDTD требует значительного увеличения вычислительной трудоёмкости для повышения разрешения сетки.

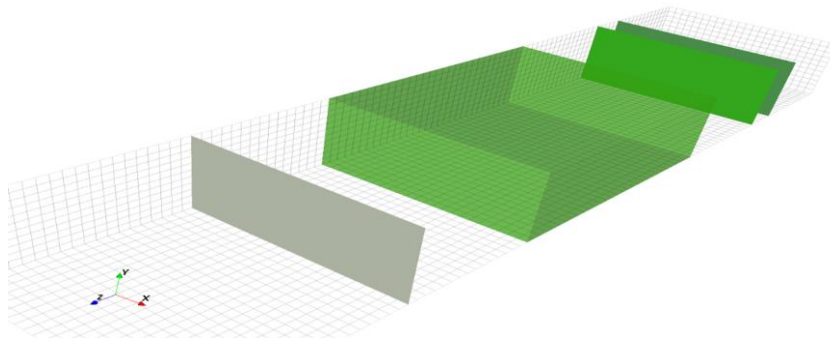
В данной работе демонстрируются результаты моделирования и производительности в программном пакете OpenEMS с различными плотностями сетки.

### 1. Подготовка модели и результаты моделирования в OpenEMS

Для проведения численного моделирования рассматриваем волновод WR-90 сечением  $22,86 \times 10,16$  мм<sup>2</sup> и длиной 200 мм, внутри которого находится вакуум (диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 1$ ), в диапазоне частот  $7 \div 13$  ГГц. В середину волновода помещается материал, полностью заполняющий сечение волновода и имеющий длину 30 мм и диэлектрическую проницаемостью  $\epsilon$ .

Было проведено численное моделирование характеристик с использованием программного пакета OpenEMS [2], в котором при численном решении электродинамических задач используется метод FDTD, а для взаимодействия с OpenEMS используется скриптовый язык Matlab/Octave. OpenEMS позволяет рассчитывать компоненты электромагнитного поля в ближней и дальней зоне, S-параметры электромагнитных систем, диаграммы направленности антенн, проводить импорт и экспорт описания объектов моделирования в заданном формате. На рисунке 1 представлена геометрия и расположение объектов для OpenEMS в программе AppCSXCAD.

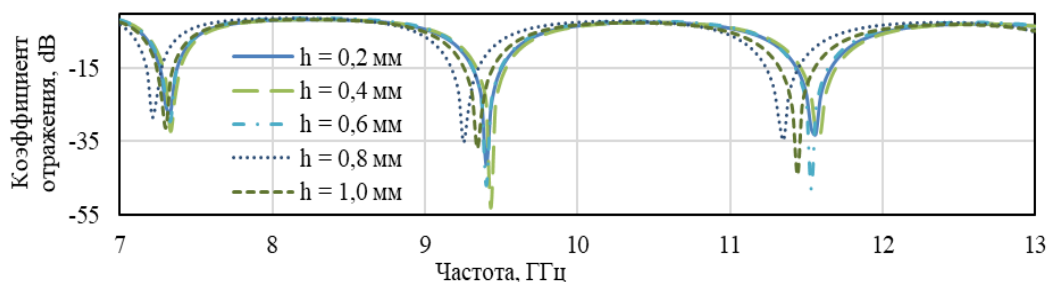
В ходе моделирования была выбрана равномерная сетка с шагом  $h$  от 1 мм до 0,2 мм. На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента отражения от частоты при различных шагах сетки для материала с  $\epsilon = 5$ . Видно, что при изменении шага сетки наблюдается сдвиг минимумов коэффициентов отражения. В таблице 1 представлены смещения минимумов коэффициентов отражения для материалов с различной диэлектрической проницаемостью. Смещение характеристик при изменении шага сетки связано с границей раздела сред материал/вакуум. Вследствие того, что на границу материала попадает только сетка электрического или магнитного поля, из-за чего происходит неточность определения геометрии материала. При уменьшении шага сетки точность определения геометрии возрастает, но при этом возрастает и время выполнения моделирования. Результаты проведенного моделирования будут использованы в учебном процессе при проведении занятий по дисциплинам, связанным с компьютерным моделированием [3–6].



**Рисунок 1.** Демонстрация геометрии и расположения объектов для OpenEMS в программе AppCSXCAD.

**Таблица 1.** Определение частот минимумов коэффициентов отражения

$\epsilon$	Номер минимума	Минимальное значение, ГГц	Максимальное значение, ГГц	Отклонение, ГГц
2,5	1	7,56	7,74	0,18
	2	10,46	10,73	0,27
5	1	7,21	7,33	0,12
	2	9,25	9,46	0,21
	3	11,35	11,56	0,21
10	1	8,16	8,34	0,18
	2	9,54	9,75	0,21
	3	11,30	11,59	0,29
	4	12,56	12,72	0,16

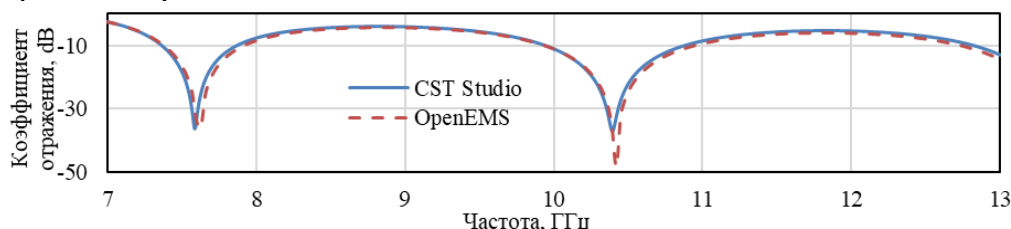


**Рисунок 2.** Зависимость коэффициента отражения от частоты материала (длина 30 мм,  $\epsilon = 5$ ) при шагах сетки от 1 мм до 0,2 мм.

## 2. Сравнение результатов моделирования OpenEMS с CST Studio

Для подтверждения правильности результатов моделирования в OpenEMS было проведено сравнение полученных результатов с результатами моделирования в CST Studio. В CST Studio был использован метод Time Domain Solver, основанный на методе конечного интегрирования (FIT) и представляющий собой последовательную формулировку дискретного представления уравнений Максвелла на пространственных сетках. Метод конечного интегрирования, впервые предложенный Вейландом [7] в 1977 г., можно рассматривать как обобщение метода FDTD. Он также похож на метод конечных элементов. Сетка в CST Studio строится неравномерно с учетом геометрии материала.

На рисунке 3 представлены зависимости коэффициентов отражения от частоты для материала с  $\epsilon = 2,5$ , полученные с помощью OpenEMS и CST Studio. На графиках зависимостей наблюдается небольшое смещение минимумов, вследствие чего можно сделать вывод о погрешности определения границы материала в результатах моделирования OpenEMS и CST Studio.



**Рисунок 3.** Зависимость коэффициента отражения от частоты материала ( $\epsilon = 2,5$ ), смоделированные в OpenEMS и CST Studio.

## 3. Сравнение производительности моделирования OpenEMS

Для сравнения производительности моделирования использовались три различных компьютера, характеристики которых представлены в таблице 2. В скрипте для OpenEMS была задана команда для вывода производительности и времени моделирования.

**Таблица 2.** Характеристики компьютеров

Обозначение компьютера	Процессор	Частота процессора, ГГц	Количество ядер	Количество потоков	Оперативная память (ОЗУ), ГБ	Операционная система
A	AMD A8-3850	2,9	4	4	4	Ubuntu
R	AMD Ryzen 3 2200GE	3,2	4	4	4	Debian
X	Intel® Xeon® CPU E5-2620 v3	2,4	6	12	16	Debian

Было проведено моделирование с различными «движками» (таблица 3) и с различным шагом сетки. На рисунках 4–5 демонстрируется сравнение скоростей вычисления одной ячейки с результатом, выполненном на компьютере А, и шагом сетки  $h = 0,2$  мм. Анализ графиков позволяет сделать вывод, что при маленьких шагах сетки распараллеливание дает увеличение производительности, причиной чего является процесс создания потоков, на который нужно затратить время. Если время создания потока больше времени жизни этого потока, то происходит увеличение общей продолжительности выполнения моделирования. Это можно наблюдать на рисунке 5 при шаге  $h = 1,0$  мм с движком fastest и компьютером X, так как время на создание 12 потоков намного больше времени просчета одной итерации по времени.

На рисунке 4а при распараллеливании с уменьшением шага  $h$  с 0,6 мм до 0,5 мм наблюдается резкое уменьшение скорости, такое явление также наблюдается на других компьютерах.

Таблица 3. Описание движков

Движок	Описание
fastest	выбирает самую "быструю" из доступных реализаций, что соответствует пунктам ниже. (по умолчанию)
basic	самая простая реализация без аппаратных оптимизаций и поэтому может быть скомпилирована для других архитектур без дополнительных усилий
sse	использует встроенные функции SSE для ускорения вычислений FDTD. Эта реализация доступна только на процессорах с набором инструкций x86 или x86_64
sse-compressed	еще больше оптимизирует движок sse, еще более интенсивно используя "параллелизм на уровне инструкций"
MPI	еще одним преимуществом MPI является то, что задача может быть разделена между несколькими компьютерами
multithreaded	multithreaded распараллеливает выполнение sse-compressed движка на всех доступных потоках с помощью MPI. Особенно это может быть полезно для систем с несколькими процессорами.
numThreads=<n>	numThreads — Принудительно использует только n потоков

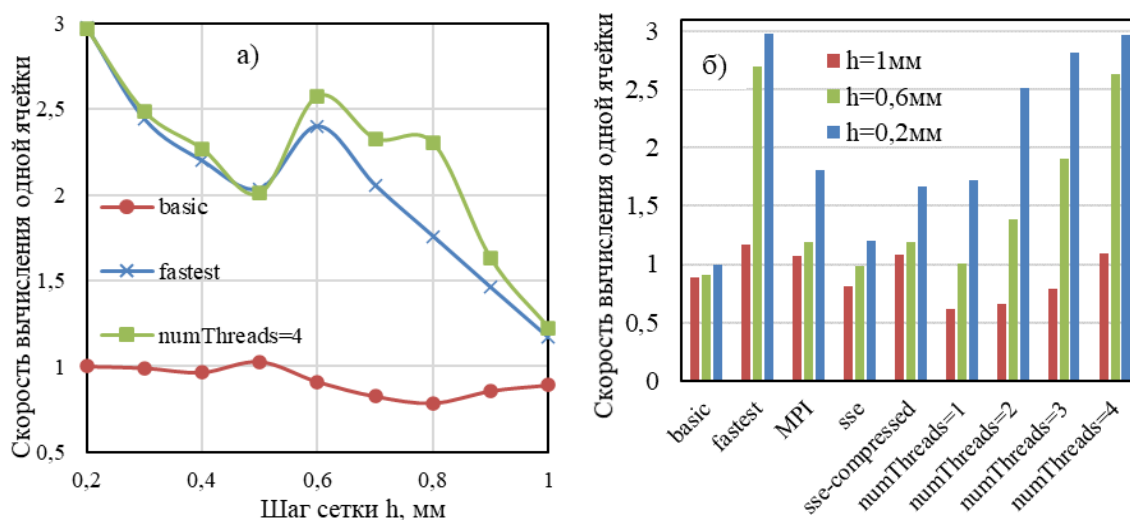


Рисунок 4. Демонстрация результатов с компьютера А: а) Зависимость скорости вычисления одной ячейки от изменения шага сетки при различных «движках». б) Зависимость скорости вычисления одной ячейки при различных «движках» при разных шагах сетки.

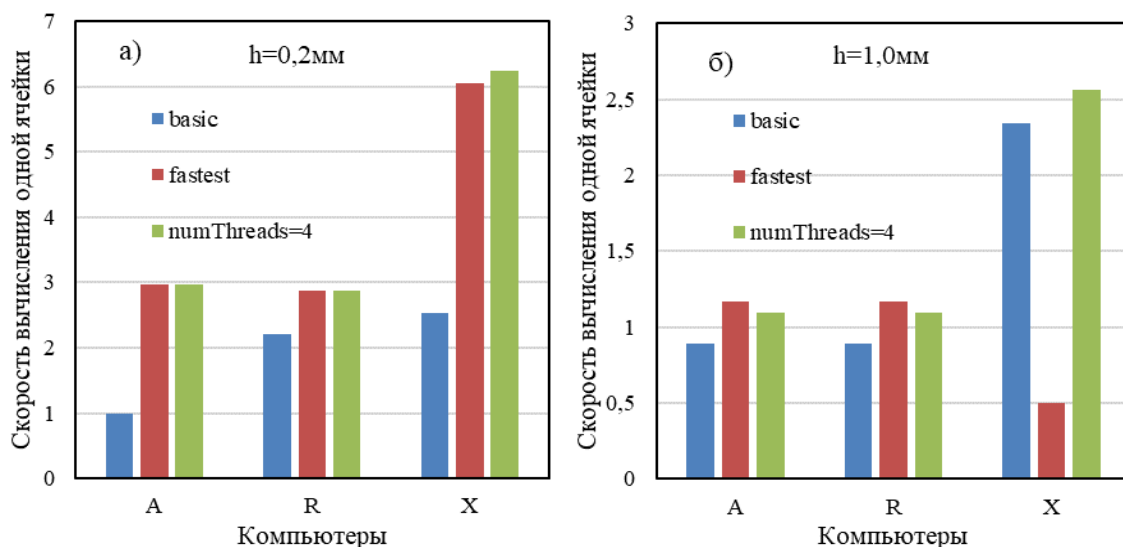


Рисунок 5. Зависимость скорости вычисления одной ячейки от разных компьютеров при различных “движках” с шагом сетки а)  $h = 0,2$  мм; б)  $h = 1,0$  мм.

## Заключение

В работе показаны результаты моделирования характеристик отражений материала с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ : 2,5; 5; 10 в программном пакете OpenEMS с равномерной сеткой. При изменении шага сетки  $h$  от 0,2 до 1,0 мм наблюдается смещение минимумов коэффициентов отражения, связанное с неточным определением геометрии материала. Сравнение результатов моделирования OpenEMS и CST Studio говорит о схожести полученных результатов. Измерения производительности моделирования на трех компьютерах разной конфигурации на однопоточный и распараллеленный алгоритмы FDTD показывают увеличение скорости вычисления. При больших шагах и большом количестве потоков происходит уменьшение скорости вычисления. Для более точного и быстрого результата необходимо учитывать геометрию материала и шаг сетки.

Исследование выполнено при **финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-07-00603 А)**.

## Список литературы

1. Yee K. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 1966. – Vol. 14. – № 3. – P. 302.
2. Liebig T. et al. openEMS – A free and open source equivalent-circuit (EC) FDTD simulation platform supporting cylindrical coordinates suitable for the analysis of traveling wave MRI applications // Intern. J. Numeric. Modell.: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2013. – V. 26. – Is. 6. – P. 680-696.
3. Сергеев С. А. Компьютер в физической лаборатории: Учеб.- метод. пособие. – Саратов: Промышленность Поволжья, 2008. – 368 с.
4. Сергеев С. А., Сысоев И. В. Компьютер в физической лаборатории: учеб.-метод. пособие / 2-е издание. – Саратов: Саратовский источник, 2013. – 304 с.
5. Сергеев С. А. и др. Основы программирования и анализа данных для задач материаловедения, биофизики и физической химии: учеб. пособие. – Саратов: Саратовский источник, 2016. – 304 с.
6. Сергеев С. А. и др. Основы программирования для задач биофизики и материаловедения: учеб. пособие. – Саратов: Амирит, 2017. – 308 с.
7. Weiland T. A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Archiv Elektronik and Uebertragungstechnik. – 1977. – Vol. 31. – P. 116-120.