

УДК 004.94:621.3.09

Шифр специальности ВАК: 2.2.14

А.А. Иванов

Численный решатель для электродинамического анализа антенн и СВЧ-устройств методом конечных разностей во временной области

Актуальность. В последние годы из-за технологических ограничений особую актуальность приобрела разработка доверенных отечественных численных решателей и программных средств для электродинамического анализа, в том числе антенн и СВЧ-устройств. **Цель работы.** Данная работа описывает достигнутый сотрудниками ТУСУРа прогресс в разработке такого решателя на основе метода конечных разностей во временной области (МКРВО). **Методы.** Разработанный решатель реализован в виде программной библиотеки на языке C++ с использованием современных средств распараллеливания вычислений. **Научная новизна.** В решатель интегрирован ряд математических моделей авторской разработки, включая модели источников возбуждения и сосредоточенных нагрузок. **Результаты.** В статье описаны основные особенности и возможности решателя. Приведены сведения о текущем состоянии разработки и будущих планах. Представлены результаты моделирования нескольких тестовых задач с использованием реализованного МКРВО и метода конечного интегрирования. Результаты хорошо согласуются, что подтверждает приемлемую точность решателя. **Практическая значимость.** Решатель может быть успешно применен при проектировании перспективных антенн и СВЧ-устройств. **Ключевые слова:** вычислительная электродинамика, компьютерное моделирование, цифровые двойники, метод конечных разностей, устройства СВЧ, антенны. **DOI:** 10.21293/1818-0442-2026-29-1-68-74

Введение

Электродинамический анализ является ключевым средством проектирования современных антенн и СВЧ-устройств, поскольку позволяет достаточно точно прогнозировать их характеристики на ранних этапах разработки – до изготовления макетов и проведения натурных испытаний [1]. Для решения задач электродинамического анализа в инженерной практике применяется целый ряд численных методов. При этом наиболее распространенными из них являются методы конечных элементов [2, 3], моментов (граничных элементов) [4, 5] и конечных разностей во временной области (МКРВО) [6, 7]. По сравнению с остальными упомянутыми методами МКРВО имеет целый ряд преимуществ, включая сниженные затраты памяти, более высокую скорость вычислений, а также возможность решения сверхширокополосных задач всего за один расчетный цикл [8]. Благодаря этому решатели на основе МКРВО и его ближайших аналогов (например, метода конечного интегрирования (МКИ) [9]) нашли широкое применение в составе известных коммерческих систем инженерного анализа, таких как CST MWS, Altair FEKO и Keysight EMPro. Однако в последние годы доступ к этим системам для отечественных специалистов стал ограниченным, поэтому особую значимость приобрела разработка аналогов таких систем и электродинамических решателей.

В данной статье представлен достигнутый прогресс в разработке собственного решателя на основе МКРВО для трехмерного электродинамического анализа антенн и СВЧ-устройств. Описаны основные функциональные возможности и особенности решателя. Приведены результаты моделирования нескольких тестовых задач. Описаны планы на дальнейшую разработку решателя.

Особенности реализации решателя

Для реализации МКРВО использован язык C++ как один из наиболее производительных. Дополнительно в коде решателя применены директивы OpenMP, что обеспечивает ускорение расчетов на многопоточных рабочих станциях. Решатель разрабатывается в виде статической библиотеки, что способствует его простой интеграции в любые программные комплексы. Программный интерфейс (API) решателя содержит небольшой набор функций для его запуска, остановки и получения результатов моделирования. При этом входные данные (анализируемые структуры, параметры источников возбуждения и нагрузок, расчетная сетка и др.) передаются в виде JSON-строк или файлов, синтаксический анализ которых осуществляется посредством интегрированной в решатель свободно распространяемой библиотеки `plohman-json`. Зависимости от других сторонних программных библиотек в решателе отсутствуют, что упрощает процесс его сборки и использования на любых аппаратных платформах и операционных системах, включая отечественные.

Для повышения эффективности расчетов алгоритм работы решателя разделен на три этапа. На этапе препроцессинга выполняются все подготовительные действия, необходимые для запуска главной итерационной процедуры моделирования, требующие лишь однократного выполнения, т.е. не зависящие от временного шага Δt . На основном этапе, используя конечно-разностные уравнения, в расчетной области производятся вычисления основных первичных параметров (напряженностей электрического и магнитного полей, плотностей электрического и фиктивного магнитного токов). Далее на этапе постпроцессинга на основе этих параметров вычисляют-

ся требующиеся пользователю величины (матрицы рассеяния, угловые диаграммы излучения и т.п.).

В качестве математического ядра решателя использована стандартная модель трёхмерной расчётной ячейки Йи. В текущей версии предусмотрена возможность моделирования частотно-независимых диэлектрических и магнитных материалов, идеальных проводников и металлов с потерями, а также анизотропных сред, заданных диагональным тензором. Для повышения точности моделирования материальных границ в решатель внедрена процедура усреднения электрофизических свойств между общими рёбрами и поверхностями ячеек (рис. 1). В качестве граничных условий реализована модель одноосного идеально согласующего слоя (от англ. *uniaxial perfectly matched layer*), обеспечивающего приемлемое поглощение падающей волны, затрачивая минимально возможное число арифметических операций. Для возбуждения расчётной области реализованы модели двух сигналов в виде стандартного и амплитудно-модулированного Гауссовых импульсов с автоматической подстройкой параметров в зависимости от заданного пользователем диапазона частот моделирования.

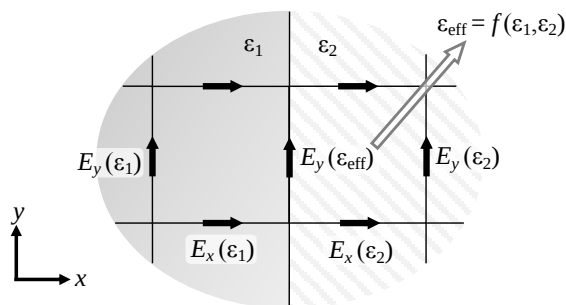


Рис. 1. Усреднение электрофизических свойств материалов на границе двух ячеек

Генерация расчетной сетки

В качестве одного из компонентов решателя разработан модуль генерации расчетной сетки. Модуль предоставляет возможность создавать неравномерные структурированные сетки с контролируемым соотношением между размерами соседних ячеек, что позволяет снизить эффект численной дисперсии. Формирование сетки производится по введенному максимальному шагу дискретизации с использованием авторского быстрого итерационного алгоритма на основе заданных 3D-объектов, границ расчетной области, а также координат расположения источников возбуждения, нагрузок, мониторов поля и др. В отличие от сеточных генераторов [10, 11] дополнительные алгоритмы оптимизации сетки не применяются, что ускоряет её получение.

Дополнительно в модуль интегрированы специальные алгоритмы прореживания точек 3D-модели, что позволяет избежать генерации вырожденных (критически малых) ячеек и избыточно плотной сетки для полигональных моделей (в формах STL, OBJ, OFF и др.), имеющих высокую степень детализации,

а также криволинейные или неортогональные осям координат поверхности. Результаты работы модуля генерации сетки (на примере спиральной печатной антенны) с использованием алгоритмов прореживания точек модели и без показаны на рис. 2.

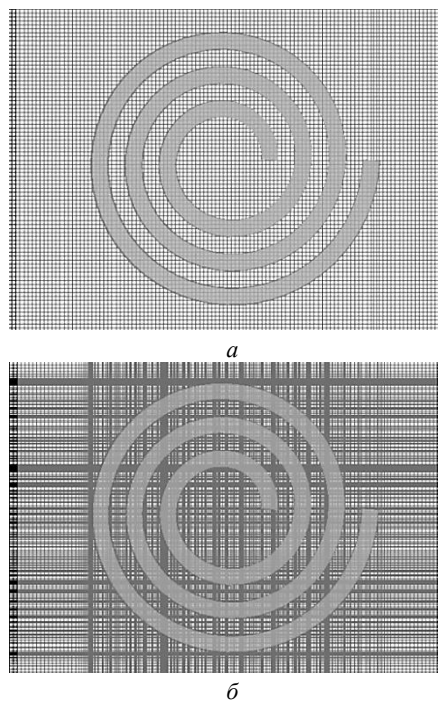


Рис. 2. Пример генерации сетки для полигональной модели с алгоритмом прореживания (а) и без него (б)

Модель дискретного порта возбуждения

Одним из источников возбуждения, реализованных в решателе, является дискретный порт. Он представляет собой сосредоточенный источник напряжения с задаваемым пользователем внутренним сопротивлением и общей подводимой мощностью 1 Вт, подключенный в середине (разрыве) идеально-проводящего тонкого провода. Решатель позволяет задавать произвольное число портов, относительно которых могут быть вычислены матрицы рассеяния (*S*-параметры), а также временные и частотные отклики токов и напряжений (рис. 3).

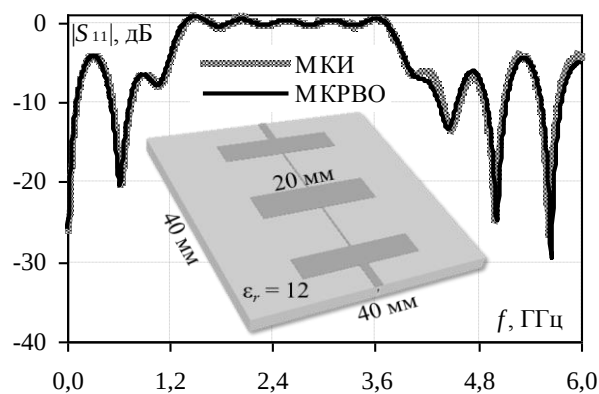


Рис. 3. Результаты расчета модуля коэффициента отражения для печатного фильтра с помощью МКРВО и МКИ (среднее отклонение 0,72 дБ)

При расчете частотно-зависимых характеристик полученные отклики нормируются на спектр используемого в расчетах сигнала возбуждения, что обеспечивает совместимость результатов с данными сторонних решателей, работающих в частотной области (методы моментов и конечных элементов). Реализованная в решателе модель порта позволяет задавать его расположение по любым двум точкам, указанным в пределах границы расчетной области. При этом для дискретизации образующегося в итоге произвольно ориентированного тонкого провода применяется авторский жадный алгоритм с автоподстройкой критерия принятия решений на каждом шаге. Пример работы данного алгоритма для тонкого провода, ориентированного неортогонально линиям сетки, представлен на рис. 4.

Источник плоской электромагнитной волны

Кроме дискретного порта в решателе также реализован источник возбуждения плоской электромагнитной волной (рис. 5). Работа источника основана на модели «Total Field/Scattered Field» [12], предусматривающей разделение расчетной области на две зоны: обратно-рассеиваемого поля и полного поля, включающего поле источника возбуждения. Внедрение этой модели позволяет применять решатель для оценки радиолокационной заметности объектов, расчета коэффициентов пропускания и отражения метаматериалов и поверхностей и других специфических задач.

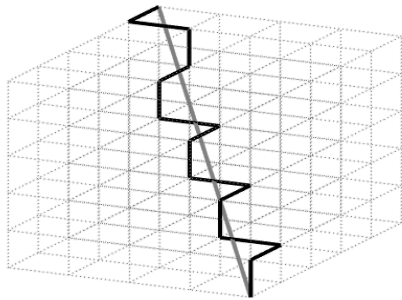


Рис. 4. Дискретизация (черная линия) произвольно ориентированного тонкого провода (серая линия)

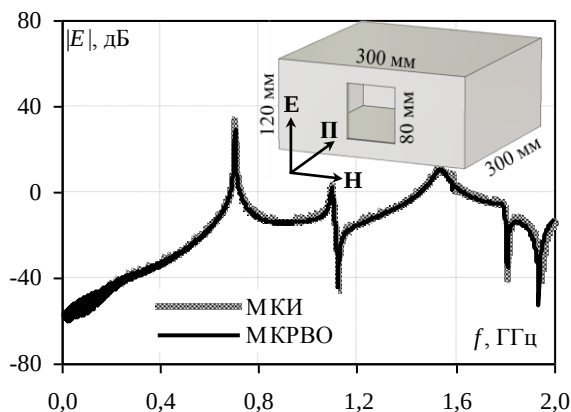


Рис. 5. Результаты расчетов модуля напряженности электрического поля $|E|$ в центре экранирующего корпуса, облучаемого плоской волной, с помощью МКИ и МКРВО (среднее отклонение 1,13 дБ)

Реализованный источник допускает гибкую настройку плоской электромагнитной волны, в том числе выбор произвольного направления распространения, а также задание амплитуды и ориентации вектора напряженности электрического (или магнитного) поля. В дополнение к широко рассмотренной в литературе линейно-поляризованной плоской волне в решатель добавлена оригинальная модель волны с эллиптической поляризацией, также позволяющая задавать произвольные параметры для поляризационного эллипса.

Модели сосредоточенных нагрузок

Помимо прочего, в решатель добавлены два варианта сосредоточенных нагрузок в виде параллельной и последовательной RLC -цепей. Оба варианта нагрузок реализованы с использованием авторских моделей на основе полуявной схемы дискретизации тока в цепях [13], обеспечивающей приемлемую численную устойчивость решения с минимальными вычислительными затратами. Для предотвращения расходимости вычислений при малых номинальных значениях RLC -элементов в решатель добавлен ряд дополнительных экспертных алгоритмов предобработки. В результате реализованные модели сосредоточенных нагрузок остаются работоспособными даже при нулевых или очень маленьких (сопоставимых с паразитными, менее 0,1 нГн и 0,1 пФ) значениях L и C . В качестве примера работы нагрузок в МКРВО на рис. 6 приведены результаты расчета модуля коэффициента отражения микрополосковой линии передачи с параллельной RLC -цепью на конце.

Инструменты мониторинга характеристик

В решателе также реализован ряд инструментов (виртуальных датчиков) для мониторинга электромагнитных полей в расчетной области. Так, интегрирована модель пробника для вычислений электрического или магнитного поля в заданной пользователем точке пространства (пример работы пробника показан на рис. 5). Модель позволяет рассчитывать как отдельно взятые x -, y -, z -компоненты полей, так и их модули (во временной области) или пиковые амплитуды (в частотной области).

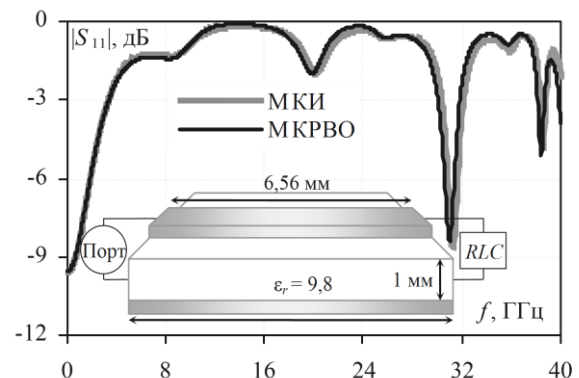


Рис. 6. Результаты расчета модуля коэффициента отражения линии передачи с параллельной RLC -цепью (с $R = 25$ Ом, $L = 0$ Гн и $C = 2$ пФ) с помощью МКИ и МКРВО (среднее отклонение 0,21 дБ)

Аналогично модели дискретного порта возбуждения в пробнике поля при расчете величин, зависящих от частоты, производится их нормировка на спектр сигнала возбуждения. Примечательно, что положение пробника не зависит от сетки, используемой в расчетах, а искомые компоненты полей в указанной точке определяются по окружающим её известным значениям путем трилинейной интерполяции.

Помимо точечного пробника в решатель также добавлена модель монитора полей дальней зоны. Данный монитор представляет собой кубоид с настраиваемыми геометрическими размерами, на границах которого при работе решателя рассчитываются электрические и фиктивные магнитные токи. Для экономии оперативной памяти эти токи хранятся в частотной области (на заданной пользователем частоте расчета дальнего поля), т.е. дискретное преобразование Фурье выполняется «на лету» прямо в процессе основного итерационного решения. Расчет полей дальней зоны осуществляется на этапе пост-процессинга согласно процедуре «Near-Field-to-Far-Field» [14] путем интегрирования рассчитанных токов по поверхности монитора. В результате определяются амплитудные и фазовые диаграммы направленности, угловые диаграммы коэффициентов усиления и направленного действия и другие характеристики, необходимые при анализе антенн. Пример использования монитора полей дальней зоны представлен на рис. 7.

На основе монитора полей дальней зоны дополнительно реализован монитор ближних полей. Этот монитор позволяет рассчитывать и сохранять компоненты напряженности электрического или магнитного поля, расположенные в пределах указанного пользователем кубоида, для их последующей трехмерной визуализации и анализа. Результаты тестовых расчетов картин электрического поля в ближней зоне печатной антенны, выполненных с помощью МКИ и разработанного решателя МКРВО, приведены на рис. 8.

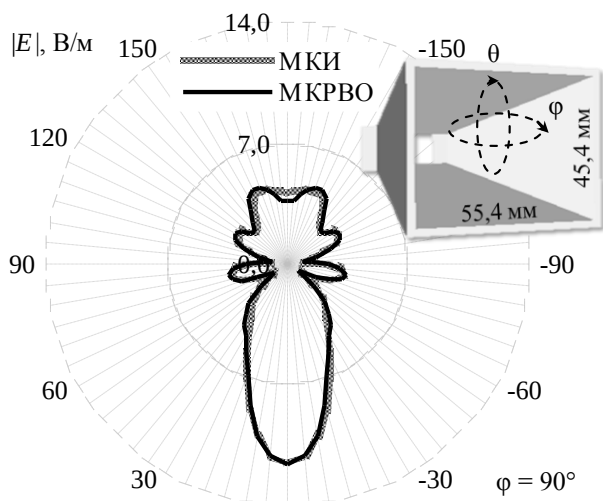


Рис. 7. Результаты расчета амплитудной диаграммы направленности рупорной антенны с помощью МКИ и разработанного МКРВО (среднее отклонение 0,23 В/м)

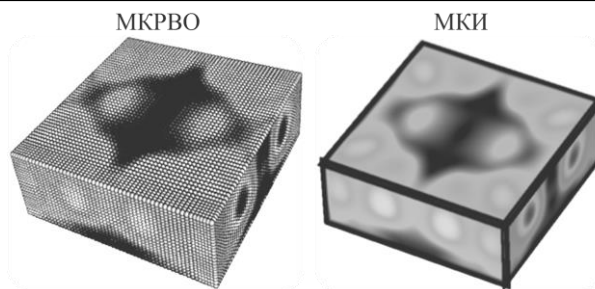


Рис. 8. Результаты расчета напряженности электрического поля вблизи печатной антенны с помощью МКИ и разработанного решателя МКРВО

Планы по дальнейшему развитию решателя

Работа над собственной реализацией МКРВО не ограничивается её вышеописанным состоянием. Так, создана дорожная карта развития решателя вплоть до 2028 г., предусматривающая постепенную оптимизацию его кода, расширение функциональных возможностей, а также интеграцию аппаратных и алгоритмических средств ускорения вычислений.

В данный момент активно ведется разработка новой модели возбуждения в виде волноводного порта, имитирующего возмущение моделируемых антенн и СВЧ-устройств, бесконечно-протяженными волноведущими структурами, что позволяет заметно увеличить точность и расширить функциональность решателя. В рамках данной работы уже реализован программный код на основе двумерного метода конечных разностей в частотной области [15], позволяющий через решение задач на собственные моды определять пространственные распределения полей, необходимые для реализации модели волноводного порта в МКРВО. Пример работы этого кода показан на рис. 9.

Вместе с тем ведется разработка источника возбуждения сторонним полем ближней зоны (от англ. near field source) [16]. Данный функционал позволит посредством пространственной декомпозиции моделировать с помощью МКРВО крупномасштабные задачи, такие как анализ антенных систем на электрически больших платформах, а также применять решатель для полунатурных испытаний (через возбуждение расчетной области измеренными распределениями полей).

В рамках дальнейшего развития возможностей решателя запланировано добавление периодических граничных условий (unit cell) [17], плоскостей симметрии (электрических и магнитных стенок), а также материалов с дисперсией (модели Лоренца, Дебая и Друда) [18] и ферритов (на основе решения уравнения Ландау–Лифшица) [19].

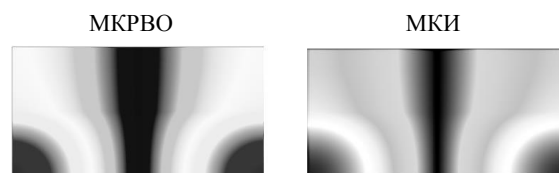


Рис. 9. Результаты расчета моды прямоугольного волновода с частичным диэлектрическим заполнением с помощью МКИ и МКРВО

Для ускорения вычислений в ближайшее время предполагается интеграция в решатель SIMD-инструкций, а также реализация процедур препроцессинга (наложения сетки на моделируемые 3D-объекты) с использованием иерархии ограничивающих объемов [20]. На будущее также запланировано внедрение функций расчета на кластерах и графических ускорителях. Наконец, в основной итерационной процедуре решателя планируется переход от кубической ячейки К. Йи к конформной расчетной ячейке [21, 22], что позволит повысить порядок точности моделирования криволинейных и неортогональных осей координат объектов вплоть до второго, т.е. избавиться от грубой «ступенчатой» аппроксимации, предусмотренной классическим алгоритмом МКРВО.

Заключение

В рамках данной статьи рассмотрен разработанный решатель на основе МКРВО для электродинамического анализа антенн и СВЧ-устройств. Описаны основные особенности реализации решателя, а также его функциональные возможности. Представлен краткий обзор интегрированных в решатель моделей генерации расчетной сетки, источников возбуждения, сосредоточенных нагрузок, а также реализованных инструментов мониторинга моделируемых характеристик. Приведены примеры расчетов, выполненных с помощью МКИ и разработанного МКРВО. Сформулированы планы на дальнейшее развитие решателя. В совокупности реализованные функциональные возможности делают решатель готовым инструментом для электродинамического анализа, а приведенные результаты подтверждают его приемлемую точность. При этом реализация запланированных работ по развитию решателя позволит расширить класс моделируемых задач, а также повысить его точность и вычислительную эффективность.

Автор выражает благодарность своим коллегам Н.Ю. Шайманову и А.А. Квасникову за помощь в разработке программного кода решателя и подготовку тестовых примеров, а также научному консультанту С.П. Куксенко за содействие в подготовке данной статьи.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

Литература

1. Григорьев А.Д. Методы вычислительной электродинамики. – М.: Физматлит, 2012. – 432 с.
2. Volakis J.L. Finite element method for electromagnetics / J.L. Volakis, A. Chatterjee, L.C. Kempel. – Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 1998. – 344 p.
3. Jin J.M. The finite element method in electromagnetics. – Third edition. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2014. – 876 p.
4. Gibson W.C. Method of moments in electromagnetics. – New York, NY, USA: Chapman and Hall/CRC, 2008. – 272 p.
5. On modeling antennas using MoM-based algorithms: wire-grid versus surface triangulation / A. Alhaj Hasan, A.A. Kvasnikov, D.V. Klyukin et al. // Algorithms. – 2023. – Vol. 16, No. 4. – P. 1–60.
6. Finite-difference time-domain methods / F.L. Teixeira, C. Sarris, Y. Zhang et al. // Nature reviews methods primers. – 2023. – Vol. 3. – P. 1–19.
7. Elsherbeni A.Z. The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MatLab simulations / A.Z. Elsherbeni, V. Demir. – Second edition. – Edison, NJ, USA: SciTech Publishing, 2015. – 560 p.
8. Advanced FDTD methods: parallelization, acceleration and engineering applications / W. Yu, X. Yang, Y. Liu, R. Mittra, A. Muto. – Norwood, MA, USA: Artech House, 2011. – 267 p.
9. Modeling of Lossy Curved Surfaces in 3-D FIT/FDTD Techniques / R.M. Makinen, H. De Gersem, T. Weiland, M.A. Kivikoski // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2006. – Vol. 54, No. 11. – P. 3490–3498.
10. Berens M.K. Structured mesh generation: open-source automatic nonuniform mesh generation for FDTD simulation / M.K. Berens, I.D. Flintoft, J.F. Dawson // IEEE Antennas and propagation magazine. – 2016. – Vol. 58, No. 3. – P. 45–55.
11. Benkler S. Mastering conformal meshing for complex CAD-based C-FDTD simulations / S. Benkler, N. Chavannes, N. Kuster // IEEE antennas and propagation magazine. – 2008. – Vol. 50, No. 2. – P. 45–57.
12. A 3-D total-field/scattered-field plane-wave source for the unconditionally stable associated Hermite FDTD method / Z. Huang, F. Jiang, Z. Chen et al. // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2024. – Vol. 23, No. 2. – P. 628–632.
13. Piket-May M. FD-TD modeling of digital signal propagation in 3-D circuits with passive and active loads / M. Piket-May, A. Taflove, J. Baron // IEEE Transactions on microwave theory and techniques. – 1994. – Vol. 42, No. 8. – P. 1514–1523.
14. Fast and efficient near to far field transformation for FDTD / B. Bural, E. Yazarel, K. Çakır, L. Sevgi // Proceedings of 2023 7th International electromagnetic compatibility conference. – Istanbul, Türkiye, 17–20 September 2023. – P. 1–3.
15. A novel compact conformal 2-D FDFD method for modeling waveports in 3-D FDTD / K. Wang, S. Zuo, Q. Wu et al. // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2024. – Vol. 24, No. 7. – P. 2091–2095.
16. Benkler S. Novel FDTD Huygens source enables highly complex simulation scenarios on ordinary PCs / S. Benkler, N. Chavannes, N. Kuster // Proceedings of 2009 IEEE Antennas and propagation society international symposium. – North Charleston, USA: IEEE, 01–05 June 2009. – P. 1–4.
17. Conformal anisotropic periodic boundary condition for FDTD method / K. Wang, Q. Wu, F. Yu et al. // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2025. – Vol. 24, No. 1. – P. 122–126.
18. Unconditional stability of the ADE-LCDI-FDTD method for dispersive media / L. Zhang, J. Chen, K. Fan et al. // IEEE Antennas and wireless propagation letters. – 2026. – Vol. 25, No. 5. – P. 2280–2284.
19. Li L. FDTD modeling dynamically biased ferrite based antennas / L. Li, Y.E. Wang // Proceedings of 2025 IEEE International symposium on antennas and propagation and North American radio science meeting. – Ottawa, Canada: IEEE, 13–19 July 2025. – P. 908–911.
20. An improved ray tracing acceleration algorithm based on bounding volume hierarchies / C. Wang, Y. Wang, Y. Li et al. // Proceedings of 2022 IEEE 96th Vehicular technology conference. – 2022. – London, United Kingdom: IEEE, 26–29 September 2022. – P. 1–6.

21. An 3-D unconditionally stable CDI-FDTD method based on the conformal technique for simulating complex curved PEC objects / Y. Chen, G. Xie, H. Hou et al. // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2025. – Vol. 72, No. 11. – P. 9333–9344.

22. A Conformal FDTD Method with Non-uniform Mesh for Anisotropic Media / K. Wang, Q. Wu, F. Yu et al. // Proceedings of 2025 International conference on microwave and millimeter wave technology. – Xian, China: IEEE, 19–22 May 2025. – P. 1–3.

Иванов Антон Андреевич

Канд. техн. наук, доцент каф. телевидения и управления (ТУ) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
ORCID: 0000-0003-1867-0689
Тел.: +7 (382-2) 70-15-18, вн. 25-69
Эл. почта: anton.a.ivanov@tusur.ru

Поступила в редакцию: 18.03.2026.

Принята к публикации: 25.05.2026.

Ivanov A.A.

FDTD-based Numerical Solver for Electrodynamic Analysis of Microwave devices and Antennas

Relevance. In recent years, technological restrictions have made the development of trusted domestic numerical solvers and software tools for electromagnetic analysis of antennas and microwave devices particularly urgent. **Purpose.** This paper describes the progress achieved by TUSUR researchers in developing such a solver based on the Finite-Difference Time-Domain (FDTD) method. **Methods.** The developed solver is implemented as a C++ software library using modern parallel computation tools. **Novelty.** The solver integrates several original custom-developed mathematical models, including formulations for excitation sources and lumped loads. **Results.** The paper describes the main features and capabilities of the solver. Information on the current development status and future roadmap is provided. Simulation results for several benchmark problems, obtained using the implemented FDTD method and the Finite Integration Technique, show good agreement, confirming the solver's satisfactory accuracy. **Practical significance.** The developed software library can be successfully applied in the design and optimization of advanced antennas and microwave devices.

Keywords: computational electromagnetics, computer simulation, digital twins, finite-difference method, microwave devices, antennas.

Funding. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-79-10165, <https://rscf.ru/project/23-79-10165/>.

DOI: 10.21293/1818-0442-2026-29-1-68-74

References

1. Grigoriev A.D. *Metody vychislitel'noj jelektrodynamici* [Methods of computational electromagnetics]. Moscow, Fizmatlit, 2012, 432 p. (in Russ.).
2. Volakis J.L., Chatterjee A., Kempel L.C. Finite element method for electromagnetics. Piscataway, NJ, USA, IEEE Press, 1998, 344 p.

3. Jin J.M. The finite element method in electromagnetics, Third edition. Hoboken, NJ, USA, John Wiley & Sons, 2014, 876 p.

4. Gibson W.C. Method of moments in electromagnetics. New York, NY, USA, Chapman and Hall & CRC Press, 2008, 272 p.

5. Alhaj Hasan A., Kvasnikov A.A., Klyukin D.V. et al. On modeling antennas using MoM-based algorithms: wire-grid versus surface triangulation. *Algorithms*, 2023, vol. 16, no. 4, pp. 1–60.

6. Teixeira F.L., Sarris C., Zhang Y. et al. Finite-difference time-domain methods. *Nature reviews methods primers*, 2023, vol. 3, pp. 1–19.

7. Elsherbeni A.Z., Demir V. The finite-difference time-domain method for electromagnetics with MatLab simulations, Second edition. Edison, NJ, USA, SciTech Publishing, 2015, 560 p.

8. Yu W., Yang X., Liu Y., Mittra R., Muto A. Advanced FDTD methods: parallelization, acceleration and engineering applications. Norwood, MA, USA, Artech House, 2011, 267 p.

9. Makinen R.M., De Gersem H., Weiland T., Kivikoski M.A. Modeling of lossy curved surfaces in 3-D FIT/FDTD Techniques. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2006, vol. 54, no. 11, pp. 3490–3498.

10. Berens M.K., Flintoft I.D., Dawson J.F. Structured mesh generation: open-source automatic nonuniform mesh generation for FDTD simulation. *IEEE Antennas and propagation magazine*, 2016, vol. 58, no. 3, pp. 45–55.

11. Benkler S., Chavannes N., Kuster N. Mastering conformal meshing for complex CAD-based C-FDTD simulations. *IEEE antennas and propagation magazine*, 2008, vol. 50, no. 2, pp. 45–57.

12. Huang Z., Jiang F., Chen Z. et al. A 3-D total-field / scattered-field plane-wave source for the unconditionally stable associated hermite FDTD method. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2024, vol. 23, no. 2, pp. 628–632.

13. Piket-May M., Taflove A., Baron J. FD-TD modeling of digital signal propagation in 3-D circuits with passive and active loads. *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 1994, vol. 42, no. 8, pp. 1514–1523.

14. Bural B., Yazarel E., Çakır K., Sevgi L. Fast and efficient near to far field transformation for FDTD. Proceedings of 2023 7th International electromagnetic compatibility conference. Istanbul, Türkiye, 2023, pp. 1–3.

15. Wang K., Zuo S., Wu Q. et al. A novel compact conformal 2-D FDFD method for modeling waveports in 3-D FDTD. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2024, vol. 24, no. 7, pp. 2091–2095.

16. Benkler S., Chavannes N., Kuster N. Novel FDTD Huygens source enables highly complex simulation scenarios on ordinary PCs. Proceedings of 2009 IEEE Antennas and propagation society international symposium. North Charleston, USA, IEEE, 2009, pp. 1–4.

17. Wang K., Wu Q., Yu F. et al. Conformal anisotropic periodic boundary condition for FDTD method. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2025, vol. 24, no. 1, pp. 122–126.

18. Zhang L., Chen J., Fan K. et al. Unconditional stability of the ADE-LCDI-FDTD method for dispersive media. *IEEE Antennas and wireless propagation letters*, 2026, vol. 25, no. 5, pp. 2280–2284.

19. Li L., Wang Y.E. FDTD modeling dynamically biased ferrite based antennas. Proceedings of 2025 IEEE International symposium on antennas and propagation and North American radio science meeting. Ottawa, Canada, IEEE, 2025, pp. 908–911.

20. Wang C., Wang Y., Li Y. et al. An improved ray tracing acceleration algorithm based on bounding volume hierarchies. Proceedings of 2022 IEEE 96th Vehicular technology conference, London, United Kingdom, IEEE, 2022, pp. 1–6.

21. Chen Y., Xie G., Hou H. et al. An 3-D unconditionally stable CDI-FDTD method based on the conformal technique for simulating complex curved PEC objects. *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2025, vol. 72, no. 11, pp. 9333–9344.

22. Wang K., Wu Q., Yu F. et al. A Conformal FDTD Method with Non-uniform Mesh for Anisotropic Media. Proceedings of 2025 International conference on microwave and millimeter wave technology, Xian, China, IEEE, 2025, pp. 1–3.

Anton A. Ivanov

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,
Department of Television and Control,
Tomsk State University of Control Systems
and Radioelectronics (TUSUR)
40, Lenin Ave., Tomsk, Russia, 634050
ORCID: 0000-0003-1867-0689
Phone: +7 (382-2) 70-15-18, ext. 25-69
Email: anton.a.ivanov@tusur.ru

Received: 18.03.2026.

Accepted: 25.05.2026.