

Научно-технический и теоретический журнал

НЕЛИНЕЙНЫЙ

№ 7, т. 10, 2012

МИР

Журнал включен в Перечень ВАК

Содержание

Главный редактор
докт. физ.-мат. наук,
проф. А. А. Потапов

РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:

чл.-корр. РАН В.И. Борисов
акад. А.С. Бугаев
акад. Ю.В. Гуляев
докт. техн. наук,
проф. А.Х. Гильмутдинов
(зам. гл. ред.)
докт. техн. наук,
проф. Ю.К. Евдокимов
канд. техн. наук
В.П. Коннов
акад. Н.А. Кузнецов
И.А. Кузьмина
докт. физ.-мат. наук,
проф. Д.С. Лукин
чл.-корр. РАН С.А. Никитов
акад. В.И. Пустовойт
докт. физ.-мат. наук
С.Ш. Рехвиашвили
акад. А.С. Сигов
докт. техн. наук,
проф. Е.М. Сухарев
акад. И.Б. Федоров
докт. физ.-мат. наук,
проф. Л.Ф. Черногор
канд. техн. наук Е.П. Чигин
докт. физ.-мат. наук,
проф. В.А. Черепенин

Зав. редакцией
И. А. Кузьмина

- Истинно случайные числа как прототип числовой системы, гипотетически располагаемой на актуальной бесконечности. Часть 2. Обоснование необходимости перехода от наглядности к описательному языку новых чисел. Частные задачи исследования. *Потапов А. А., Струков А. В.* 403
- Современные датчики волоконно-оптических приемников. *Сигов А.Г., Белик Ю.Д., Нефедов В.И., Лобанов Б.С., Битюков В.К., Меньшиков В.В.* 414
- Нелинейные алгоритмы внесения предсказаний для компенсации многолучевого характера каналов связи. *Нечаев Ю.Б., Малютин А.А.* 425
- Моделирование распространения радиоволн в зданиях с применением метода конечных интегралов и технологий геопространственного моделирования. *Сысоев Н.Н., Захаров П.Н., Королев А.Ф., Потапов А.А., Турчанинов А.В.* 439
- Фазовая синхронизация в сигналах магнитоэнцефалограмм при фоточувствительной эпилепсии. *Панищев О. Ю., Дёмин С. А., Идиятова М. Р.* 448
- Моделирование процессов иммерсионной ультрафиолетовой литографии на этапе аванпроектирования. *Балан Н.Н., Васин В.А., Ивашов Е.Н., Костомаров П.С., Степанчиков С.В.* 454
- Математическое и программное обеспечение фрактального распознавания природных и искусственных объектов. *Аветисов А. С., Карпов М. А., Юрков М. В., Егорова Е. В., Нефедов В. И., Харитонов А. Ю.* 460
- Гиперболический закон ускоренного расширения Вселенной. *Ковалев В.А., Ковалев И.В.* 465
- Облик припланетной ретрансляционной системы связи, используемой при выполнении пилотируемых полетов к Луне. *Урличич Ю.М., Ежов С.А., Ватутин В.М., Молотов Е.П., Снегирев В.М.* 468

Contents

Truly random numbers as a prototype of numerical system hypothetically located on actual infinity. A part 2. Justification of need of transition from presentation to descriptive language of new numbers. Private research problems. <i>Potapov A. A., Strukov A. V.</i>	413
Contemporary detector fibre optics receiver. <i>Sigov A.S., Belik U.D., Nefedov V.I., Lobanov B.S., Bitukov V.K., Menshikov V.V.</i>	424
Nonlinear precoding algorithms for indemnification of multipath character of communication channels. <i>Nechaev Yu.B., Malyutin A.A.</i>	438
Indoor radio propagation simulation with finite integration technique and geospatial technologies implication. <i>Sysoev N. N., Zakharov P. N., Korolev A. F., Potapov A. A., Turchaninov A. V.</i>	447
Phase synchronization in MEG signals at photosensitive epilepsy. <i>Panischev O. Yu., Demin S. A., Idiyatova M. R.</i>	453
Modeling ultraviolet lithography processes immersion stage design advances. <i>Balan N. N., Vasin V. A., Ivashov E. N., Kostomarov P. S., Stepanchikov S. V.</i>	459
Mathematical and the software fractal recognition of natural and artificial objects. <i>Avetisov A. S., Karpov M. A., Urkov M. V., Egorova E. V., Nefedov V. I., Haritonov A. U.</i>	464
Hyperbolic law accelerated expansion of the Universe. <i>Kovalev V.A., Kovalev I.V.</i>	467
The look of a near-planet relaying communication system to be used for manned missions to the Moon. <i>Urlichich Yu. M., Ezhov S. A., Vatutin V. M., Molotov E. P., Snegirev V. M.</i>	480

**Полный перечень и содержание журналов,
выпускаемых ЗАО «Издательство «Радиотехника»,
размещен на сайте <http://www.radiotec.ru>**

Выходит при поддержке ФГУП «Федеральный НПЦ «Радиоэлектроника» им. В.И. Шимко» (г. Казань)



Учредитель ЗАО «Издательство «Радиотехника». Свидетельство о регистрации ПИ № 77–14779.

Сдано в набор 21.06.2012. Подписано в печать 17.07.2012. Формат 60×88¹/₈.

Печ. л. 10. Тираж 350 экз. Изд. № 31.

107031, Москва, К-31, Кузнецкий мост, д. 20/6. Тел./факс +7(495)621-48–37.

e-mail: 2070-0970@radiotec.ru; <http://www.radiotec.ru>

Дизайн и допечатная подготовка ЗАО «САЙНС-ПРЕСС».

Отпечатано в ООО «Галлея-Принт». Тел.: (495) 673-57-85; факс: (495) 777-81-28 E-mail: galleyaprint@gmail.ru.

ISSN 2070-0970

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2012 г.

Незаконное тиражирование и перевод статей, включенных в журнал, в электронном и любом другом виде запрещено и карается административной и уголовной ответственностью по закону РФ «Об авторском праве и смежных правах»

Моделирование распространения радиоволн в зданиях с применением метода конечных интегралов и технологий геопроостранственного моделирования

© Авторы, 2012

Н.Н. Сысоев – д. ф.-м. н., профессор, декан физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, зав. кафедрой «Молекулярная физика»

E-mail: sysoev@phys.msu.ru

П.Н. Захаров – ст. науч. сотрудник, кафедра «Фотоника и физика микроволн», физический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова

E-mail: zakharov1@mail.ru

А.Ф. Королёв – к. ф.-м. н., доцент, кафедра «Фотоника и физика микроволн», физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

E-mail: korolev_phys@mail.ru

А.А. Потапов – к. ф.-м. н., магистр географии, ст. науч. сотрудник, кафедра «Рациональное природопользование», географический факультет, МГУ им. М. В. Ломоносова

E-mail: al_ptv@mail.ru

А. В. Турчанинов – ст. науч. сотрудник, Центр гидрофизических исследований физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

E-mail: aturmail54@mail.ru.

Рассмотрена технология моделирования распространения радиоволн внутри помещений посредством комплексирования технологий геопроостранственного моделирования и метода конечных интегралов; показана возможность создания радиотехнической модели здания посредством интеграции его трехмерной модели в среду CST Microwave Studio и проведения на ее основе моделирования пространственного распределения электромагнитного поля; доказано экспериментально, что в условиях помещений среднеквадратическая точность прогноза среднего уровня радиосигнала на частотах 400 и 900 МГц в $\lambda/2$ окрестностях точек измерения варьировалась от 3,6 до 5,2 дБ; приведены результаты моделирования и натурного измерения временных профилей рассеяния радиосигнала на базе созданной радиотехнической модели здания.

Ключевые слова: распространение радиоволн, метод конечных интегралов, радиотехническая модель здания, геоинформационные технологии.

The article covers author's technology for indoor radio propagation prediction based upon finite integration technique (FIT) and geospatial technologies integration. The 3D building's model import into CST Microwave Studio software is the main component of indoor environment radiotechnique model creation, which can be used for electromagnetic field spatial distribution prediction. The experimental verification of FIT consistency had shown that the mean field level (averaged over $\lambda/2$ region around indoor measurement points) root-mean-square error varied over 3,6...5,2 dB interval for frequencies 400 and 900 MHz. The workshop also describes the results of experimental assessment and FIT simulation of radio signal delay profile using building's radiotechnique model.

Keywords: radio propagation, finite integration technique (FIT), indoor environment radiotechnique model, geospatial technologies.

Электромагнитные поля радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) являются одной из наиболее изменчивых в пространственном отношении и сложных в прогнозировании характеристик среды, которая одновременно определяет такие важные показатели, как надежность функционирования и границы обслуживания систем беспроводной связи и уровень электромагнитной безопасности радиопередающих средств. Это требует разработки методов и технологий моделирования распространения радиоволн в условиях обитаемых сред эффективных при практическом применении.

Современное развитие методов прогноза распространения радиоволн связано с совершенствованием детерминированных методов расчета, использующих точные знания о среде распространения, точные в том смысле, что метод расчета устойчив к флуктуациям параметров модели (неточность информации о размерах и местоположении объектов среды, их электромагнитных характеристиках и т. п.). Как правило, приемлемой ошибкой предсказания считается среднеквадратическое отклонение порядка

5...10 дБ по уровню электромагнитного поля. К наиболее используемым детерминированным методам можно отнести следующие:

разнообразные приближения геометрической оптики;

методы параболического волнового уравнения и численные методы электродинамики [1].

Таким образом, в распоряжении исследователя имеется широкий набор детерминированных методов моделирования распространения ЭМП РЧ, однако до сих пор на их базе не создана универсальная методика моделирования, одновременно позволяющая:

с высокой достоверностью определить значение поля в произвольной точке;

полноценно задействовать в расчете трехмерные модели среды без ограничения степени их детализации;

эффективно работать на доступных вычислительных мощностях.

В связи с этим каждый из методов используется в своей функциональной нише: методы численной электродинамики – для детальных расчетов – в условиях малого объема (помещения), а геометрикооптические методы и методы решения волновых уравнений – для расчетов на открытых пространствах на расстояниях порядка 5...10 км от передатчика и более с пространственным разрешением от нескольких десятков метров и грубее.

Применение детерминированных методов моделирования распространения ЭМП РЧ невозможно без метрически-корректных цифровых моделей среды. В настоящее время основным инструментом создания таковых являются системы геопространственного моделирования, чаще всего представленные геоинформационными системами – ГИС, которые позволяют преобразовывать информацию об окружающей среде и ее состоянии в массив структурированных цифровых данных, что обеспечивает создание двух- и трехмерных метрически корректных моделей среды, адаптированных для проведения физического моделирования с высоким разрешением и пространственно-ориентированного анализа его результатов [2].

Однако, несмотря на очевидную важность задачи моделирования окружающей среды, на практике прогноз условий распространения радиоволн на методологическом уровне не рассматривается как комплексная задача, включающая как определение оптимального алгоритма моделирования процесса распространения электромагнитных волн (в зависимости от диапазона частот, расстояний и детализации), так и разработку адекватной выбранному алгоритму технологии моделирования среды их распространения.

Особенно актуальна эта проблема при исследованиях распространения ЭМП РЧ в зданиях, которые требуют корректного моделирования их внутренней структуры, что, в силу его сложности, часто приводит к использованию упрощенных подходов (внутренняя планировка строения моделируется как набор плоских экранов, отражающих расположение внешних стен и внутренних перегородок без учета дверей и окон или моделирование последних осуществляется посредством разрывов в стенах). [3, 4]. А адекватная методика моделирования должна удовлетворять следующим критериям: быть адаптированной к формату исходных данных об объекте, адекватно передавать реальную, вещественную и измеримую внешнюю и внутреннюю структуру объекта и обеспечивать возможность экспорта/импорта созданной модели в специализированные приложения для использования в задачах физического моделирования.

С учетом этих критериев разработана технология создания цифровых проблемно-ориентированных моделей (ЦПОМ) зданий в среде ГИС ArcGIS, реализующая принцип двойного адаптивного структурирования данных. В рамках этого принципа информация о конструкции здания сначала по определенным правилам квантуется на простые элементы, а затем совокупность этих элементов еще раз структурируется, адаптируясь к специфике виртуальной среды, где проводится моделирование, и одновременно к требованиям, обеспечивающим прогноз распространения радиоволн [2].

Апробация технологии была проведена на примере здания физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова и участка прилегающей местности. Основой для создания модели здания послужили его поэтажные планы, прошедшие процедуру объектно-ориентированной векторизации и дополненные материалами натурных обследований строения. Последние также позволили для участков двух этажей здания создать модель сверхвысокой детализации общей площадью около 3 500 м² (суммарная площадь здания составляет 37 000 м²), включавшую модели элементов оконного проема и стационарных металлических элементов интерьера (батареи отопления, электрические щиты и т. п.). На рис. 1 приведен пример созданной высокодетализированной ЦПОМ здания физического факультета МГУ, интегри-

рованной в цифровую модель прилегающей местности, а на рис. 2 приведен в крупном масштабе фрагмент модели здания сверхвысокого пространственного разрешения в месте проведения экспериментальных работ (в левой части рисунка видны модели оконного блока и батарей отопления).

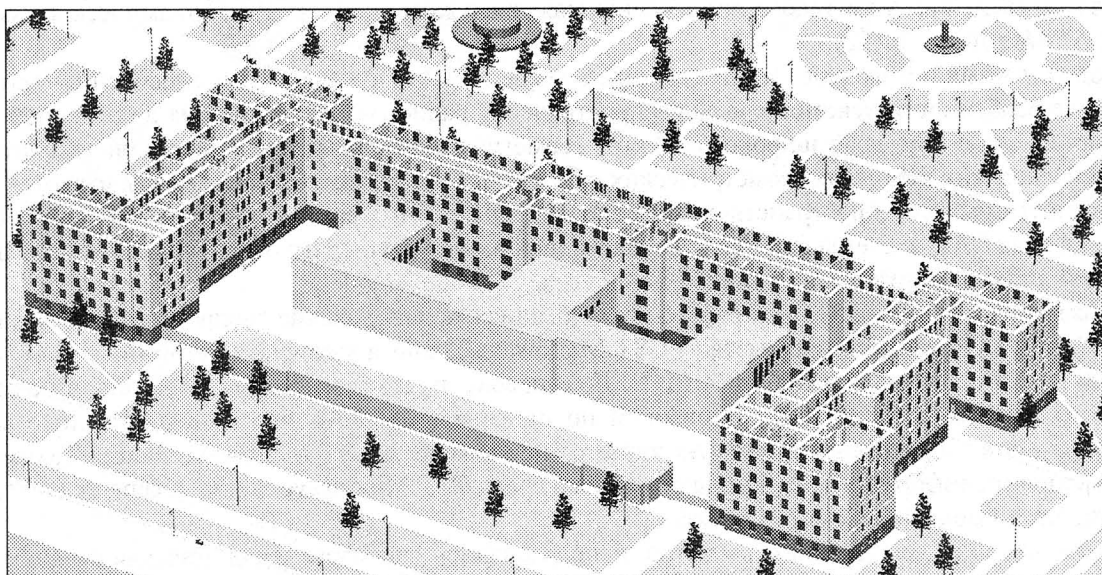


Рис. 1. ЦПОМ здания физического факультета МГУ (показана внутренняя структура одного из этажей) и прилегающей местности

Численные методы решения уравнений Максвелла являются одними из наиболее точных методов прогноза распределения высокочастотного электромагнитного поля. Тем не менее, в виду высокой вычислительной трудоемкости, они, в основном, находили применение для моделирования СВЧ-устройств и антенн, определения коэффициентов прохождения/отражения сквозь объекты с неоднородной структурой и т. д. [5], а при прогнозировании условий распространения радиоволн – в составе комбинированных методов [6] и по мере роста вычислительных возможностей, охватывая пространства до первых десятков метров [7].

В условиях ограниченного пространственного охвата (десятки длин волн) и в кусочно-однородной анизотропной среде с размерами неоднородностей сравнимыми с длиной волны, что характерно для внутренних объемов зданий, для моделирования распространения радиоволн эффективен метод конечных интегралов (Finite Integration Technique – FIT). Этот метод обеспечивает универсальную схему пространственной дискретизации, которую можно применять к различным случаям, начиная со статического поля и заканчивая высокочастотными расчетами во временной и частотной областях.

В отличие от большинства численных методов метод конечного интегрирования рассматривает уравнения Максвелла не в дифференциальной, а в интегральной форме. В процессе численного решения этих уравнений определяется область расчета. Далее создается сетка расчета, разбивающая эту область на ячейки. Эту сетку называют первичной. Но вводится еще одна, вторичная или двойная сетка, которая строится ортогонально первичной. Пространственная дискретизация уравнений Максвелла производится на этих двух ортогональных сетках. После этого уравнения Максвелла отдельно записываются для каждой грани ячейки и формируется набор так называемых сеточных уравнений Максвелла [8]:

$$\mathbf{C}\mathbf{e} = -\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{b}, \quad \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} = \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{d} + \mathbf{j}, \quad (1), (2)$$

$$\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} = \mathbf{q}, \quad \mathbf{S}\mathbf{b} = 0. \quad (3), (4)$$

Практическое применение численных методов электродинамики на сегодняшний день неразрывно связано с использованием доступного на рынке специализированного программного обеспечения. Это существенно повышает эффективность проведения работ, так как для конечных пользователей отсутст-

вует необходимость разрабатывать программные продукты и/или алгоритмы моделирования, а возможности программ по созданию или экспорту соответствующих пространственных моделей оборудования и/или среды его функционирования обеспечивают актуальность результатов расчетов для решения конкретных задач [5]. Примером такого приложения может служить пакет электродинамического моделирования *CST Microwave Studio*.

Метод конечных интегралов, реализованный в среде *CST Microwave Studio*, способен в полной мере учесть все особенности искомой среды распространения радиоволн. Информация о последней может быть представлена с помощью широкого спектра геометрических примитивов, в том числе синтезированных из нескольких исходных геометрических объектов. В программном обеспечении имеются широкие возможности импорта пространственных моделей из различных систем пространственного моделирования, включая CAD системы с полной визуализацией их структуры, что обеспечивает импорт цифровых моделей в таких форматах как *.sat, *.dxf и других.

В рассматриваемых в настоящей работе исследованиях моделирование распространения радиоволн в здании было осуществлено посредством *CST Microwave Studio* и уже упомянутой цифровой модели здания физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, подготовленной в среде геоинформационной системы ArcGIS, а затем преобразованной по оригинальной методике в твердотельную модель (*3D Solid*) формата .sat, который напрямую читается приложением *CST Microwave Studio*. Таким образом, интеграция геоинформационной модели здания в среду *CST Microwave Studio* обеспечила переход к радиотехнической модели искомого объекта.

Непосредственно для данных расчетов использовались два фрагмента цифровой проблемно-ориентированной модели физического факультета МГУ сверхвысокой детализации: 1) фрагмент модели, охватывающий область проведения измерений и соседние непосредственно примыкающие помещения площадью около 100 м²; 2) фрагмент модели, охватывающий больший фрагмент этажа здания площадью около 400 м².

Моделирование распространения радиоволн осуществлялось для двух положений изотропного передатчика, расположенных в пределах означенного участка здания, на частотах 400 и 900 МГц. Параметры рабочей станции, на которой проводился расчет: двухъядерный процессор Intel 2,6 ГГц, 2 Гб оперативной памяти. Время расчета составляло от 40 мин до 3 ч в зависимости от частоты. Для получения фактических данных для оценки точности прогнозирования уровня электромагнитного поля, помимо компьютерного моделирования, были проведены экспериментальные измерения уровней радиосигнала в условиях размещения передатчика и точек приема в границах помещений чьи трехмерные цифровые модели были экспортированы в среду *Microwave Studio*. Для измерений уровня радиосигнала и его генерации использовался векторный анализатор Rohde & Schwarz ZVB-20 (частотный диапазон 10 МГц...20 ГГц). В качестве передающей/приемной антенн применялись широкополосные антенны АШП-2 (рабочий диапазон частот 30 МГц...3 ГГц).

Измерения проводились в 60 точках на высоте 2 м от пола, по регулярной сети с шагом 1 м в условиях одной из учебных аудиторий и по линиям профилей по осям прилегающих к ней коридоров с шагом 1 м. При проведении эксперимента и моделировании использовались два положения передатчика (излучающей антенны) (рис. 2): непосредственно в учебной аудитории, в которой расположено большинство точек измерения, (положение 1) и в коридоре на расстоянии около 6,5 м от ее входа (положение 2). На рис. 2 приведен внешний вид трехмерной модели аудитории и прилегающих коридоров, а также расположение точек измерения и обоих позиций передатчика.

При обработке результатов моделирования распределения уровня поля и результатов экспериментальных измерений все значения усреднялись в $\lambda/2$ окрестностях точек для устранения влияния быстрых замираний. При этом в ходе экспериментальных измерений для уменьшения влияния интерференционных эффектов вместо метода малых смещений антенны использовался метод малых смещений частоты (frequency sweep), т. е. использовалось частотное, а не пространственное осреднение, что избавляет от необходимости механических перемещений антенны и дает аналогичные результаты с точки зрения осреднения данных (необходимым условием корректности применения метода малых смещений частоты является возможность пользователя управлять параметрами генератора радиосигнала).

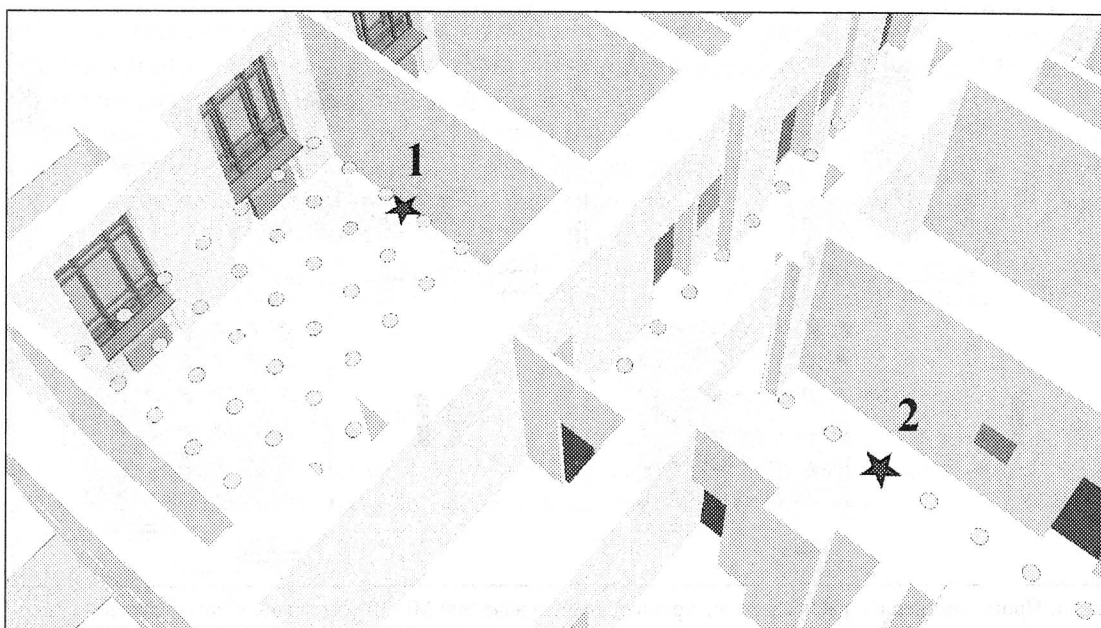


Рис. 2. Схема расположения точек измерения уровней радиосигналов 400 и 900 МГц в помещениях здания физического факультета (показаны окружностями); расположение передатчиков показано звездочками (положения 1 и 2)

На рис. 3 и 4 приведены пространственные распределения уровней сигнала 900 МГц как по данным экспериментальных измерений, так и по результатам моделирования в среде приложения Microwave Studio для положений 1 и 2 передатчика. Для визуализации экспериментальных данных они были интегрированы в атрибуты точечного слоя сети измерений и осуществлен переход к непрерывным растровым распределениям с помощью функций интерполяции ГИС ArcGIS. Тоновыми градациями показаны изменения относительных уровней радиосигнала на 3 дБ, нормированных относительно точек, расположенных на расстоянии 1 м от передатчиков. В таблице представлены среднеквадратические отклонения результатов моделирования распределения уровня поля от результатов экспериментальных измерений (с учетом усреднения в $\lambda/2$ окрестностях точек).

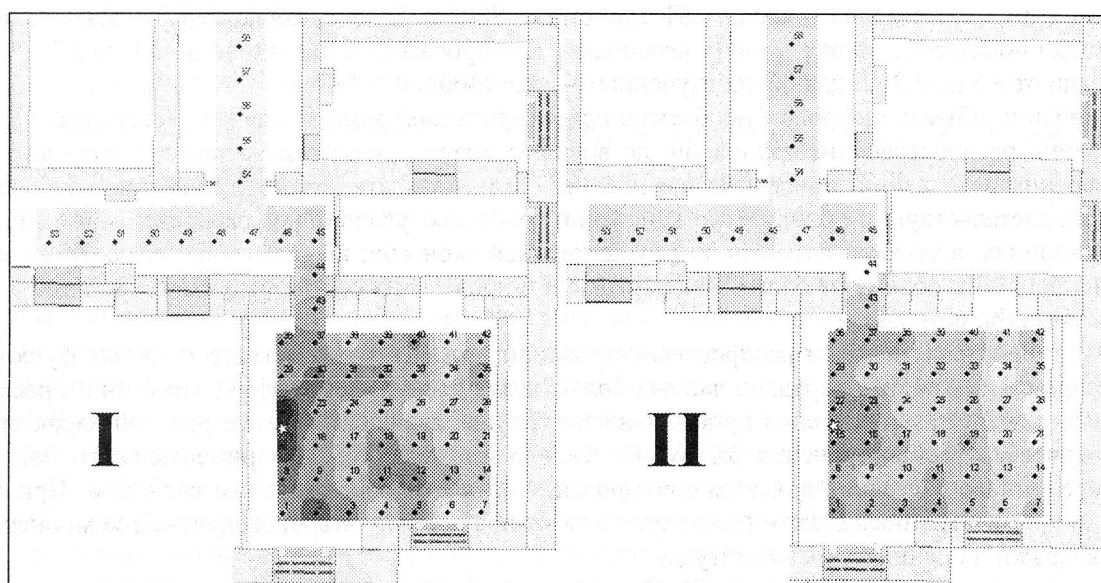


Рис. 3. Пространственное распределение уровня радиосигнала 900 МГц в помещениях при положении передатчика 1 по данным экспериментальных измерений (I) и моделирования в среде CST Microwave Studio (II); шаг тоновой градации 3 дБ; цифрами указаны номера точек измерения; шаг регулярной сетки измерений 1 м

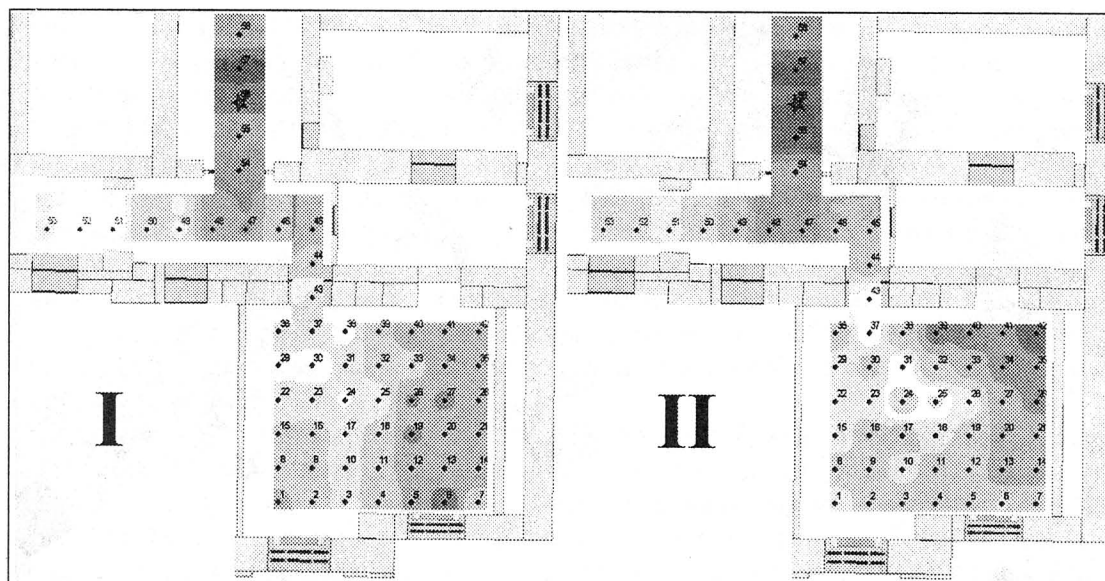


Рис. 4. Пространственное распределение уровня радиосигнала 900 МГц в помещениях при положении передатчика 2, остальные обозначения аналогичны рис. 3

Среднеквадратические отклонения данных расчетов методом конечных интегралов в среде CST Microwave Studio от результатов измерений

Частота, МГц	Площадь цифровой модели здания, использованной для расчетов, м ²	Положение 1 передатчика, среднеквадратическое отклонение для доли площади помещения, дБ			Положение 2 передатчика, среднеквадратическое отклонение для доли площади помещения, дБ		
		80 %	90 %	100 %	80 %	90 %	100 %
400	400	2,1	2,6	3,6	2,9	3,9	5,2
	100	2,3	2,7	3,7	—	—	—
900	400	3,7	4,3	5,2	3,3	3,9	4,6

Сравнение результатов расчета среднего уровня поля в $\lambda/2$ окрестностях точек пространства и результатов экспериментальных измерений показало достаточно высокую точность прогноза уровня поля методом конечных интегралов в среде CST Microwave Studio. Среднеквадратическое отклонение для 80 % площади помещения, охваченной измерениями, варьировалось в диапазоне от 2,1 до 3,7 дБ, а для всей площади от 3,6 до 5,2 дБ для обоих изученных частот (400 и 900 МГц).

Ограничение объема цифровой проблемно-ориентированной модели здания, использованной при моделировании распространения радиоволн, до внешних границ, непосредственно прилегающих к области измерения помещений, привело к повышению среднеквадратического отклонения не более чем 0,3 дБ, что свидетельствует о приоритетном значении локальных условий для распределения амплитуды ЭМП РЧ в зданиях, а также о возможности существенной экономии вычислительных ресурсов за счет вычленения искомого объема из общей модели здания и проведения соответствующих расчетов с минимизированным объемом данных.

Наряду с пространственным распределением амплитуды электромагнитного поля для функционирования современных систем передачи данных большое значение имеет профиль временного рассеяния радиосигнала в месте расположения приемника/передатчика, являющийся интегральной характеристикой многолучевого распространения радиоволн. Основным способом экспериментального получения профиля временного рассеяния является зондирование среды широкополосным сигналом. При достаточной ширине спектра последнего, появляется возможность различать многолучевые компоненты по времени задержки и оценивать их амплитуды.

Программная среда CST Microwave Studio позволяет представлять решения и во временной области. С точки зрения проектирования систем связи, рассчитанный профиль задержек позволяет судить о временном рассеянии в канале, что важно для оптимального выбора методов модуляции и эквализации

радиосигнала в задачах передачи информации. Для получения профилей задержек в заданных точках модели здания устанавливаются так называемые мониторы напряженности (Voltage Monitors), обеспечивающие анализ радиосигнала во временной области.

В данной работе был использован способ измерения профиля задержек на основе преобразования Фурье комплексной частотной характеристики радиоканала. Допустим, известна частотная характеристика канала $H(\omega)$. Умножим ее на спектр гауссовского радиоимпульса (5), имеющего временную форму (6):

$$S(\omega) = \frac{A}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\beta}} \left[e^{-\frac{(\omega-\omega_0)^2}{4\beta}} + e^{-\frac{(\omega+\omega_0)^2}{4\beta}} \right], \quad (5)$$

$$s(t) = A e^{-\beta t^2} \cos(\omega_0 t), \quad H_g(\omega) = H(\omega) S(\omega). \quad (6), (7)$$

Спектр (7) эквивалентен спектру радиоимпульса гауссовской формы, прошедшему через канал $H(\omega)$. Возьмем преобразование Фурье от области положительных частот $H_g(\omega)$:

$$z(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} H_g(\omega) e^{j\omega t} d\omega. \quad (8)$$

Модуль аналитического сигнала $z(t)$ есть огибающая временной формы сигнала [9]. Таким образом,

$$g(t) = |z(t)| \quad (9)$$

есть профиль временного рассеяния канала при зондировании гауссовым радиоимпульсом (6). Измеряя комплексную частотную характеристику канала в области положительных частот, можно получить профиль временного рассеяния, а варьируя параметры ω_0 и β в (6), можно изменять центральную частоту и длительность зондирующего радиоимпульса.

При обработке экспериментальных данных использовалось окно Ханнинга, имеющее меньшую локализацию в частотной области, чем гауссовское окно (5), и позволяющее плотнее приблизиться к границам частотного диапазона, чем в случае гауссовского окна. Оконная функция Ханнинга имеет вид

$$S(f, f_{\min}, f_{\max}) = 0,5 - 0,5 \cos\left(\frac{2\pi(f - f_{\min})}{f_{\max} - f_{\min}}\right), \quad (10)$$

где $f_{\min}$ и $f_{\max}$ – границы окна в частотной области.

Центральная частота соответствующего радиоимпульса равна $(f_{\min} + f_{\max})/2$, полоса частот (по нулевому уровню) равна $f_{\max} - f_{\min}$. Именно эти значения полосы и центральной частоты будут применяться при дальнейших описаниях полосы и частоты, использованных для вычисления профиля временного рассеяния.

Для экспериментального измерения профилей временного рассеяния использовался программно-аппаратный комплекс, осуществляющий прямое измерение комплексной частотной характеристики канала. Комплекс состоял из уже упомянутых векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVB-20, антенн сверхширокополосных АШП-2, подводющих фидеров с низкими потерями и управляющей ЭВМ с программой автоматизации измерений и сохранения результатов. С целью максимального ослабления влияния источников помех, присутствующих в эфире, была выбрана малая полоса разрешения анализатора по частоте (100 Гц). Для построения профилей временного рассеяния использовался ранее описанный способ – преобразование Фурье измеренной комплексной частотной характеристики и определение огибающей с помощью вычисления модуля аналитического сигнала.

Ввиду значимой вычислительной трудоемкости расчеты в CST Microwave Studio были выполнены лишь в нижней части доступного частотного диапазона. Из-за этого значения центральной частоты и полоса зондирующего импульса не могли быть большими – была выбрана несущая частота 400 МГц и

полоса сигнала 200 МГц. При таких параметрах большинство многолучевых компонент разрешены быть не могут, однако вид отклика позволяет судить об огибающей профиля временного рассеяния. На рис. 5 представлены прогнозируемые и измеренные профили временного рассеяния для одной из обследованных таким образом точек (№ 20 – см. рис. 3 и 4). Здесь изображены профили временного рассеяния, рассчитанные в CST Microwave Studio с использованием радиотехнической модели малого и большого пространственного охватов. Расчет на малой модели хуже прогнозирует огибающую профиля временного рассеяния, особенно в области больших задержек, что, очевидно, следует из отсутствия взаимодействий с объектами, расположенными на больших расстояниях. Результаты измерений для ряда других точек в пределах зоны эксперимента были близки к таковым на рис. 5. При этом необходимо отметить, что при малой ширине полосы зондирующего сигнала местоположение локальных максимумов профиля временного рассеяния и их значения не следует рассматривать как многолучевые компоненты, а лишь как результат интерференции близких компонент, чем, в том числе, объясняется отличие прогнозируемых и измеренных профилей.

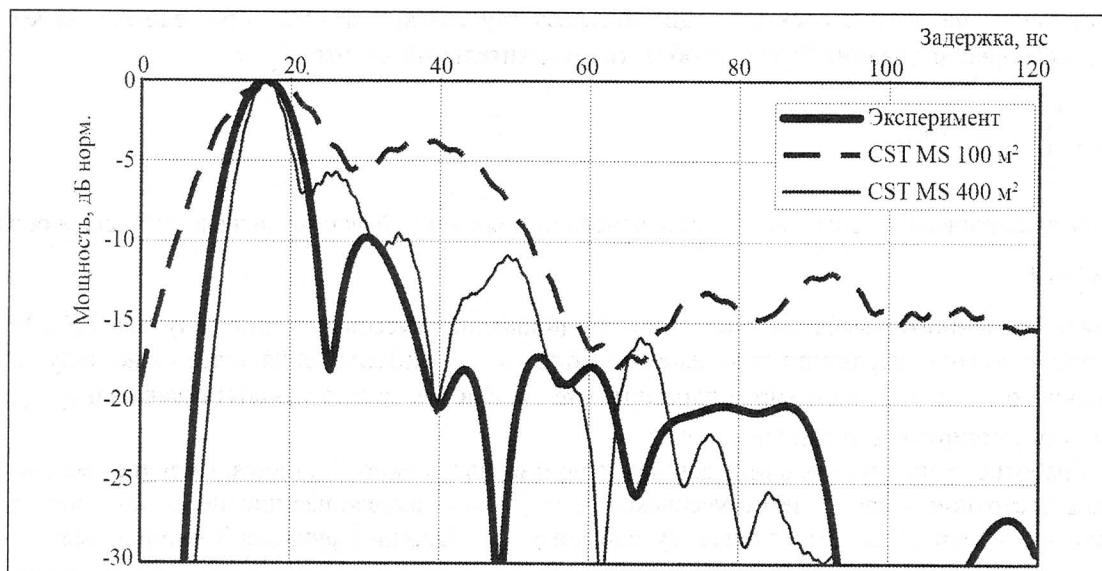


Рис. 5. Профили временного рассеяния в точке № 20, полученные экспериментально (несущая частота 400 МГц, ширина полосы зондирующего сигнала 200 МГц) и рассчитанные в CST Microwave Studio для большой и малой радиотехнических моделей помещения

Из представленных данных можно сделать вывод, что численные методы электродинамики удовлетворительно прогнозируют характер многолучевого профиля, особенно в зоне прямой видимости и небольших расстояний от передатчика. Это может быть объяснено меньшим влиянием неточности геометрических параметров модели на малых расстояниях, что в свою очередь свидетельствует о важности степени детализации модели здания в непосредственной окрестности от приемо-передающих устройств и делает актуальным методы геопро пространственного моделирования строений сверхвысокого пространственного разрешения.

Разработанная технология создания цифровых проблемно-ориентированных моделей зданий в среде ГИС ArcGIS реализует принцип двойного адаптивного структурирования данных. Технология включает в себя совокупность оригинальных методов структурирования и математической обработки пространственно-координированных данных.

Впервые разработана технология создания цифровых проблемно-ориентированных моделей зданий сверхвысокой детализации, т. е. с пространственным разрешением выше чем у исходной инженерно-строительной документации, включающая алгоритмы детального моделирования оконных проемов и стационарных предметов интерьера здания и методы сопряжения сверхвысоко детализированных элементов с моделью здания базового уровня детальности.

Структура данных ЦПОМ зданий делает возможным ее экспорт непосредственно в среду приложения электродинамического моделирования CST Microwave Studio, что обеспечивает переход к полноценной радиотехнической модели объекта и возможность моделирования распространения радиоволн с учетом внутренней структуры помещений.

Экспериментальная оценка точности прогноза уровней электромагнитного поля 400 и 900 МГц методом конечных интегралов в среде CST Microwave Studio показала, что среднеквадратическая точность прогноза среднего уровня радиосигнала в $\lambda/2$ окрестностях точек измерения для 80 % площади помещения составила от 2,1 до 3,7 дБ, а для всей площади от 3,6 до 5,2 дБ.

На базе метода конечных интегралов в среде CST Microwave Studio возможен прогноз временных профилей рассеяния радиосигнала на базе радиотехнической модели здания. Сравнение расчетных профилей временного рассеяния с экспериментальными данными зондирования (несущая частота зондирующего импульса 400 МГц, полоса сигнала 200 МГц) показало, что возможен корректный прогноз огибающей профиля задержек радиосигнала при пространственном охвате радиотехнической модели помещения, включающем как само помещение, так и конструкционные элементы зданий за ближайшими ограждающими конструкциями.

Литература

1. Сухоруков А. П., Бабушкин А. К., Дудов Р. А., Захаров П. Н., Козарь А. В., Королев А. Ф., Потанов А. А., Пухов Е. А., Турчанинов А. В. Распространение радиоволн в обитаемых средах: физические, информационные и экологические аспекты // Радиотехника. 2009. № 5. С. 40 – 49.
2. Капица А. П., Потанов А. А. Общая методология эксперимента в исследованиях пространственной неоднородности электромагнитных полей радиочастотного диапазона // ДАН 2011. Т. 441. № 2. С. 242 – 244.
3. Matschek R. A geometrical optics and uniform theory of diffraction based ray tracing optimisation by a genetic algorithm // C. R. Physique. 2005. № 6. P. 595 – 603.
4. Bertoni H. L. Radio Propagation for Modern Wireless Systems. New Jersey: Prentice hall. 2001.
5. Гринев А. Ю. Численные методы решения прикладных задач электродинамики. М.: Радиотехника, 2012.
6. Chaudhuri Y. W., Safavi-Naeini S. K. An FDTD / ray-tracing analysis method for wave penetration through inhomogeneous walls // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2002. № 11 P. 1598 – 1604.
7. Nagy L. Indoor Propagation Modeling for Short Range Devices // The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007). 2007. P. 1 – 6.
8. Clemens M., Weiland T. Discrete electromagnetism with the finite integration technique // Progress in Electromagnetic Research, PIER 32. 2001. P. 65 – 87.
9. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа. 2000.

Indoor radio propagation simulation with finite integration technique and geospatial technologies implication

© Authors, 2012

N. N. Sysoev, P. N. Zakharov, A. F. Korolev, A. A. Potapov, A. V. Turchaninov

The article covers author's technology for indoor radio propagation prediction based upon finite integration technique (FIT) and geospatial technologies integration.

In the article the developed technology of digital problem-oriented building models (DPOMs) synthesis within geographic information system (GIS) ArcGIS software is presented; the technology utilizes the principle of double adaptive geospatial data structuring. The DPOMs are developed using construction blueprints, special methods of blueprint's vectoring and subsequent vector data structuring and mathematical processing.

GIS ArcGIS software is also implemented in ultra-detailed digital problem-oriented indoor models creation; ultra-detailed models have more information about indoor environment than there is within construction blueprints, therefore the methods of ultra-high resolution modeling of window frames and significant indoor interior objects (including metal hardware) together with the ways of merging ultra-resolution models with basic DPOM of a building are developed.

Due to the special and original structure of vector data and it's semantic component DPOMs can be successfully and easily exported to electrodynamics simulation software *CST Microwave Studio*; this transfer provides transformation of a DPOM into a full functional indoor environment radiotechnique model, which supports finite integration technique implementation for radio propagation simulation subject to local indoor layout.

Spatial distribution of 400 and 900 MHz fields within indoor radiotechnique model extent was computed by *CST Microwave Studio* software for two positions of a transmitter: within lecture room and the adjacent hall. Experimental verification of FIT consistency for frequencies 400 and 900 MHz had shown that the mean field level (averaged over $\lambda/2$ region around indoor measurement points) root-mean-square error varied over 2,1...3,7 dB range for 80 % area coverage and over 3,6...5,2 dB interval for the entire area.

CST Microwave Studio are capable of computing filed solutions in time domain. Delay profile is crucial for wireless systems design because it contains aggregated information about multipath situation on-site, which is the base for optimal radio signal modulation and equalization selection in hi-speed data transmission objectives. Experimental comparison of FIT time domain solutions based on radiotechnique model with experimental results (carrier frequency of an impulse 400 MHz; bandwidth 200 MHz) had shown correct FIT simulation of envelope curve of the actual delay profile provided the extent of radiotechnique model includes both the room itself and the nearest area beyond its walls.