

Раздел II. Моделирование физических процессов и систем

УДК 621.396.98

А.И. Паньчев, А.А. Ваганова

АНАЛИЗ МНОГОЛУЧЕВОЙ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОМЕЩЕНИИ С ГРУППОЙ ПРЕПЯТСТВИЙ

Рассмотрен подход к оценке интенсивности сигналов беспроводных локальных сетей связи в помещениях, основанный на оригинальном многоуровневом алгоритме трехмерной лучевой трассировки, адаптированном к решению задач синтеза лучевой траектории и основанном на процедуре предварительного анализа состава лучей, приходящих в точку приема при заданном положении передатчика. Произведено обобщение алгоритма на группу из нескольких препятствий, произвольно расположенных в объеме помещения. Работа алгоритма иллюстрирована моделью помещения в виде прямоугольного параллелепипеда, внутри которого расположены три препятствия также в форме прямоугольных параллелепипедов. Передатчик сигнала расположен внутри помещения. Рассмотрен случай, когда три препятствия сгруппированы вплотную у одной из стен помещения, что имитирует сложный рельеф поверхности этой стены. Приведены результаты работы алгоритма для прямого луча в виде картин затенения, полученных для различных по высоте горизонтальных сечений помещения. Также представлены картины затенения, полученные для различных по высоте горизонтальных сечений помещения, иллюстрирующие области тени, сформированные препятствиями для отраженных от стен лучей. Анализ полученных результатов показывает, что они полностью соответствуют постулатам геометрической оптики и свидетельствуют о правильности работы предложенного алгоритма. По приведенным результатам видно, что в область тени занимает значительную часть как внутреннего пространства, так и ограничивающих поверхностей. Следовательно, использование предложенного алгоритма с целью исключения этих областей из анализа на следующем этапе расчета поля приведет к существенному упрощению расчета и, следовательно, снижению временных затрат.

Алгоритм; многолучевое распространение; трехмерная лучевая трассировка; область тени; интенсивность электромагнитного поля.

A.I. Panychev, A.A. Vaganova

ANALYSIS OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD MULTIRAY STRUCTURE IN THE ROOM WITH A GROUP OF OBSTACLES

The approach to the estimation of the intensity of wireless local area network signals in the rooms, based on the original multi-level algorithm of three-dimensional ray tracing, adapted to the solution of the ray trajectory synthesis problems and based on the procedure of a preliminary analysis of the composition of the rays arriving at the receiving point at a predetermined position of the transmitter. In this paper we make a generalization of the algorithm on a group of several obstacles arbitrarily placed in the space of a room. The algorithm is illustrated in the model space as a rectangular parallelepiped, inside which there are three obstacles are also the same shape. Signal transmitter is located inside the room. The case where the three obstacles are grouped closely at one of the walls of the room is discussed. The results of the algorithm work for the direct beam is shown as paintings of shading obtained for the different heights of horizontal sections of the room. The shading pattern obtained for the different heights of horizontal sections of the room,

showing the shadow generated by the obstacles for the rays reflected from the walls, are also presented. Analysis of the results shows that they are fully consistent with the postulates of geometrical optics and demonstrate the correct operation of the proposed algorithm. According to the results shown above it is clear that the shadow region occupies a significant part of both the interior space and bounding surfaces. Consequently, the use of the algorithm in order to exclude these areas from analysis in the next step of electromagnetic fields calculating will lead to a significant simplification of calculation and will consequently reduce time-consuming.

Algorithm; multipath propagation; three-dimensional ray tracing, shadow region; the intensity of the electromagnetic field.

Введение. Основными инструментами теоретического исследования процессов формирования многолучевых радиоканалов в условиях городской застройки, а также внутри зданий и отдельных помещений, являются приближенные статистические и детерминистские методы [1–16]. Анализ интенсивности поля в этих ситуациях связан также с изучением прохождения электромагнитных волн через многослойное препятствие, в приближении геометрической оптики и квазиоптическом случае такие задачи рассмотрены в [17–23].

Существенным недостатком статистических методов является их удовлетворительная точность только при частотно-территориальном планировании телекоммуникационных сетей городского масштаба. Разработчики же локальных беспроводных сетей связи внутри зданий, как правило, отдают предпочтение детерминистским методам. При этом наиболее употребителен универсальный метод сканирующих лучей, основными ограничениями которого являются ориентированность на двумерные случаи, плохая приспособленность к оптимизации расчета и потребность в значительных вычислительных ресурсах.

В [24–27] предложен и разработан основанный на трехмерной лучевой трассировке геометрооптический подход к оценке уровня радиосигналов в помещениях, обеспечивающий сокращение вычислительных затрат в сравнении с методом сканирующих лучей. Здесь построение многолучевой структуры поля базируется на процедуре определения зон затенения для лучей с различными механизмами распространения, что позволяет исключить непроизводительные вычисления за счет предварительного отсева лучей, не приходящих в точку приема при заданном положении передатчика и препятствия. Синтез лучевой траектории проникновения радиосигналов в смежные помещения без учета отражения от внутренних границ раздела областей пространства изложен в [28–30]. В этих работах представлены примеры использования алгоритма трехмерной лучевой трассировки для помещения с одиночным препятствием прямоугольной формы. Естественным дальнейшим развитием алгоритма является его обобщение на произвольное число препятствий сложной формы.

Постановка задачи. С целью расширения функциональных возможностей предложенного в [25] алгоритма трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети разработать его дополнение в части усложнения формы препятствий и увеличения их количества до произвольного конечного числа.

Базовые положения алгоритма. Разрабатываемый алгоритм базируется на следующих положениях.

1) Отражение, преломление и дифракция радиоволн описываются на основе методов геометрической оптики, зеркального изображения и геометрической теории дифракции.

2) Реальные объекты, моделируются простейшими геометрическими телами, для которых известны решения модельных задач дифракции.

Поверхность произвольного выпуклого объекта, являющегося препятствием на пути распространения радиолучей, аппроксимируется плоскими многоугольниками. С целью оптимизации вычислительной части алгоритма используются многоугольники одного типа, в зависимости от степени кривизны поверхности.

Чтобы моделировать многолучевой канал радиосвязи как в присутствии одностороннего препятствия сложной формы, так и при наличии группы отдельных объектов, используется декомпозиция препятствия сложной формы на простые тела – тетраэдры или гексаэдры типа косоугольного трапецеэдра.

3) Используется принцип модульности внутреннего пространства здания, в соответствии с которым весь объем разделяется на отдельные кластеры, обладающие характерными геометрическими чертами. Для каждого изолированного кластера выполняется лучевая трассировка радиоволн.

4) Сочленение кластеров производится путем «сшивания» общих граней. Для этого предусмотрена возможность использования для каждой грани модуля различных материалов, в том числе и материала со свойствами вакуума.

5) Идентификационными признаками каждого луча являются:

- ◆ азимутальный и угломестный углы выхода из точки расположения передатчика;
- ◆ угол падения для каждого отражения;
- ◆ координаты каждой точки отражения, дифракции и прохождения;
- ◆ суммарная длина хода;
- ◆ азимутальный и угломестный углы прихода в точку расположения приемника;
- ◆ вектор поляризации;
- ◆ количество отражений;
- ◆ количество дифракций;
- ◆ количество прохождений сквозь препятствия;
- ◆ структура луча – прямой; одно-, дву- и большей кратности отражения; дифракционный на ребре, вершине или гладкой поверхности; прошедший из смежного модуля; комбинированный (отражение – дифракция – прохождение в любом сочетании).

6) Для каждого луча заранее задается максимальное количество учитываемых отражений, дифракций и прохождений. Луч, исчерпавший этот лимит, исключается из дальнейшего анализа.

7) Трассировка лучей в каждом кластере, входящем в состав группы, формирующей пространство помещения, выполняется с учетом лучей, отраженных или прошедших из соседних модулей. При этом каждая точка на общей грани модулей рассматривается как вторичный источник с диаграммой направленности в виде дельта-функции, задающей направление луча в смежном модуле, и с амплитудой и поляризацией этого луча.

8) На этапе трассировки формируются условия тени для каждого луча внутри кластера (прямого, отраженных от внутренних поверхностей помещения, лучей многократного отражения от стен и препятствий в произвольном порядке). Это позволяет оптимизировать процедуру трассировки лучей, исключив из рассмотрения области пространства, где луч данной структура отсутствует.

Алгоритм расчета электромагнитного поля в помещении состоит из нескольких структурных слоев.

На первом, базовом, слое алгоритма используются основные аналитические соотношения. Сюда входят процедуры, позволяющие определить:

- ◆ коэффициенты уравнения плоскости, заданной различными способами;
- ◆ коэффициенты уравнения линии пересечения двух плоскостей;
- ◆ координаты вектора нормали к плоскости;
- ◆ координаты точки пересечения прямой и плоскости;
- ◆ координаты точки пересечения двух прямых;
- ◆ угол пересечения двух плоскостей;

- ◆ угол пересечения прямой и плоскости;
- ◆ угол пересечения между двумя прямыми;
- ◆ нормальную и тангенциальную составляющие вектора относительно плоскости;
- ◆ координаты зеркального изображения точки относительно плоскости.

Затем определяется взаимное расположение точки (передатчика или приемника) и препятствия, что включает такие процедуры как:

- ◆ выработка координат вектора нормали (внешней или внутренней) к поверхности препятствия;
- ◆ проверка точки на принадлежность поверхности препятствия – лежит ли точка на грани, ребре или вершине тела;
- ◆ проверка точки на принадлежность внутреннему объему препятствия;
- ◆ проверка грани, ребра и вершины препятствия на «освещенность» лучами источника радиоволн.

Следующий слой работы алгоритма – формирование зон, занятых тенью предметов, расположенных в помещении.

Формирование области пространства, занятой тенью от препятствия для луча выбранной структуры базируется на процедуре построения области тени за некоторой плоской фигурой, одной из тех, с помощью которых аппроксимируется поверхность препятствия. В случае, когда препятствие моделируется многогранником, гранью поверхности является плоский многоугольник.

Алгоритм проверки, находится ли выбранная точка пространства в области тени, отбрасываемой плоским N -угольником, состоит в следующем (рис. 1). Исходными данными являются:

- ◆ координаты точки расположения источника радиоволн $p^i=(x^i, y^i, z^i)$;
- ◆ координаты точки расположения приемника $p^r=(x^r, y^r, z^r)$, для которой проверяется принадлежность области тени;
- ◆ координаты вершин **1, 2, 3, ..., N**, определяющих положение многоугольника в пространстве.

На первом шаге проверяется, расположены ли точки p^i и p^r по одну сторону от плоскости многоугольника. Если да, то вырабатывается решение, что точка p^r не принадлежит области тени. В противном случае проверка продолжается. Сначала формируются координаты $p=(x, y, z)$ произвольной точки, принадлежащей многоугольнику. Затем проверяется, находятся ли точки p и p^r по одну сторону от плоскости, определяемой тремя точками – источником p^i и двумя соседними вершинами многоугольника (на рис. 1 представлен случай, когда плоскость проходит через вершины **1, 2**). Такая проверка производится последовательно для всех сторон многоугольника. Если хотя бы для одной из пар соседних вершин точки p и p^r окажутся по разные стороны от плоскости, значит, точка p^r не принадлежит области тени и процедура прекращается. Таким образом, в алгоритме минимальное количество сравнений равно единице, а максимальное составляет $N+1$ раз.

Третий слой алгоритма выполняет трассировку лучей, проникающих в смежные помещения или, напротив, из соседних помещений в рассматриваемый объем пространства [28, 29]. Также производится синтез траекторий многократно преломленных лучей, отраженных от какой-то из внутренних границ раздела многослойного препятствия и вернувшихся в одну из внутренних областей между разделяющими пространство поверхностями [30].

Расчет траекторий преломленных лучей выполняется на основе решения системы векторных уравнений. Определяется набор векторов, каждый из которых представляет собой радиус-вектор точки преломления рассчитываемого луча на разграничивающих поверхностях

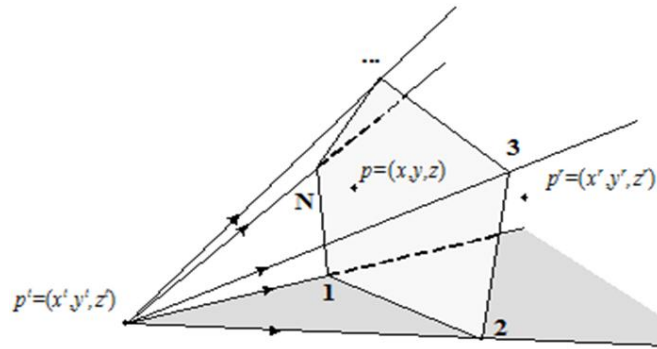


Рис. 1. К алгоритму формирования тени, образуемой плоским многоугольником

Итогом синтеза траектории многократно преломленного луча внутри здания является множество координат точек преломления, которые позволяют определить:

- ◆ факт существования преломленного луча в анализируемой точке приема, являющийся необходимым и достаточным условием для выполнения дальнейшего вычисления парциального комплексного коэффициента передачи луча;
- ◆ направление выхода луча из точки передатчика, что позволяет учесть направленные свойства передающей антенны;
- ◆ направление прихода луча в точку приема, что дает возможность учесть диаграмму направленности приёмной антенны;
- ◆ углы падения на каждую преломляющую поверхность, необходимые для расчета коэффициентов преломления и оценки поляризационных эффектов;
- ◆ длину луча в каждой среде, на основании чего рассчитываются основное затухание и фаза волны в конце трассы.

На четвертом, заключительном, слое алгоритма выполняется расчет интенсивности электромагнитного поля в зоне покрытия системы связи с учетом электрофизических свойств объектов и всех геометрических параметров, рассчитанных на предыдущих этапах.

Разработка алгоритма учета группы препятствий. Произведем обобщение второго слоя алгоритма на группу из нескольких препятствий, произвольно расположенных в объеме помещения.

Считаем, что модель помещения имеет форму произвольного выпуклого шестигранника типа косоугольного трапецеэдра. Внутри помещения находится несколько препятствий такой же формы. Количество и взаимное расположение препятствий произвольное. Внутри помещения в точке T_x расположен источник электромагнитного поля (рис. 2).

Геометрия помещения задается координатами (x, y, z) его вершин. В рассматриваемом случае все вершины можно описать с помощью различных комбинаций шести чисел – максимального и минимального значений координат x, y и z соответственно.

Количество, форма, размер и местоположение препятствий фиксируются следующим образом. Задается количество препятствий N , где N – произвольное целое положительное число. Каждое из препятствий является таким же объектом алгоритма, как и помещение, и описывается координатами своих вершин. Для этого создается шесть массивов координат размерностью $1 \times N$. Первый массив содержит начальные координаты всех препятствий по оси Ox , то есть минимально возможное для каждого из препятствий значение координаты x , второй массив содержит

жит конечные координаты всех препятствий по оси Ox , то есть максимальные значения x . Аналогичным образом создаются массивы для координат по оси Oy (третий массив содержит минимальное значение y для каждого препятствия, четвертый – максимальное) и по оси Oz (пятый и шестой массивы). Затем в цикле заданные координаты компонуются таким образом, чтобы сформировать N препятствий, вершины которых описываются этими координатами.

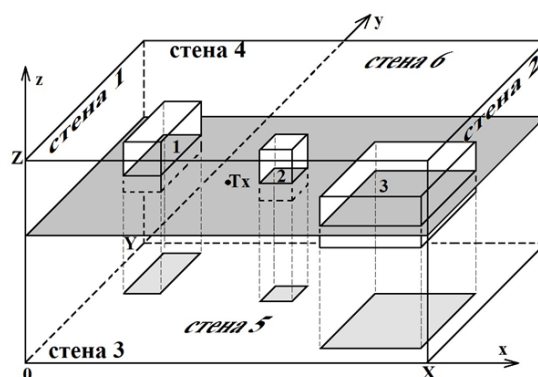


Рис. 2. Модель помещения с группой препятствий

Процедура формирования теней для помещения с группой препятствий состоит из нескольких этапов. Сначала с помощью цикла для каждого из препятствий проверяется, лежит ли точка, в которой оценивается уровень поля, вне этого препятствия (но при этом внутри рассматриваемого помещения). Если точка оказывается внутри хотя бы одного препятствия, то она автоматически попадает в область тени и для нее расчет окончен, в противном случае расчет продолжается.

Следующим этапом формирования областей пространства, занятых тенями, является проверка условия существования тени для лучей выбранной структуры (прямых, отраженных от стен, отраженных от препятствий, дифракционных). Суть этой процедуры состоит в том, что сначала в цикле определяются области тени, создаваемые каждым из препятствий по отдельности, а затем они объединяются, и таким образом формируется общая картина затенения в помещении.

Обсуждение результатов. В общем случае модель помещения может иметь форму произвольного выпуклого шестигранника, но для численного моделирования использован прямоугольный параллелепипед, как наиболее часто встречающаяся форма помещения.

Рассмотрим случай, когда три препятствия сгруппированы вплотную у одной из стен помещения, что имитирует сложный рельеф поверхности этой стены. Такое расположение препятствий изображено на рис. 3.

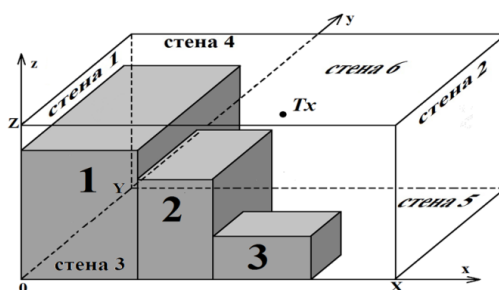


Рис. 3. Модель помещения с группой препятствий

На рис. 4 приведены поясняющие компоновку препятствий сечения помещения с расположенными внутри объектами в горизонтальной (рис. 4,а) и вертикальной (рис. 4,б) плоскостях с указанием фактических размеров.

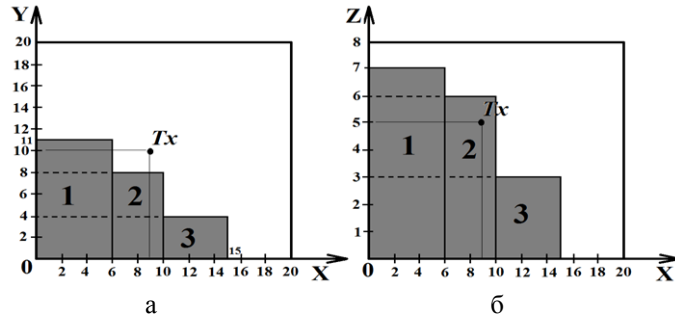


Рис. 4. Сечение помещения с препятствиями

Результаты работы алгоритма для прямого луча, вносящего наибольший вклад в интенсивность поля в помещении, представлены на рис. 5 в виде картин затенения для различных по высоте горизонтальных сечений помещения.

Рис. 5,а-г иллюстрируют затенение в области, расположенной ниже источника сигнала, при этом, на рис. 5,а-в, т.е. в области, где расположены все три препятствия, все они создают область тени. Рис. 5,д соответствует сечению, в котором находится передатчик (высота равна 5 м). Рис. 5,з показывает область тени, сформировавшуюся выше препятствий. По приведенным рисункам видно, что третье препятствие практически не оказывает влияние на формирование области тени для прямого луча в сечениях, расположенных значительно выше препятствия (рис. 5,г-з).

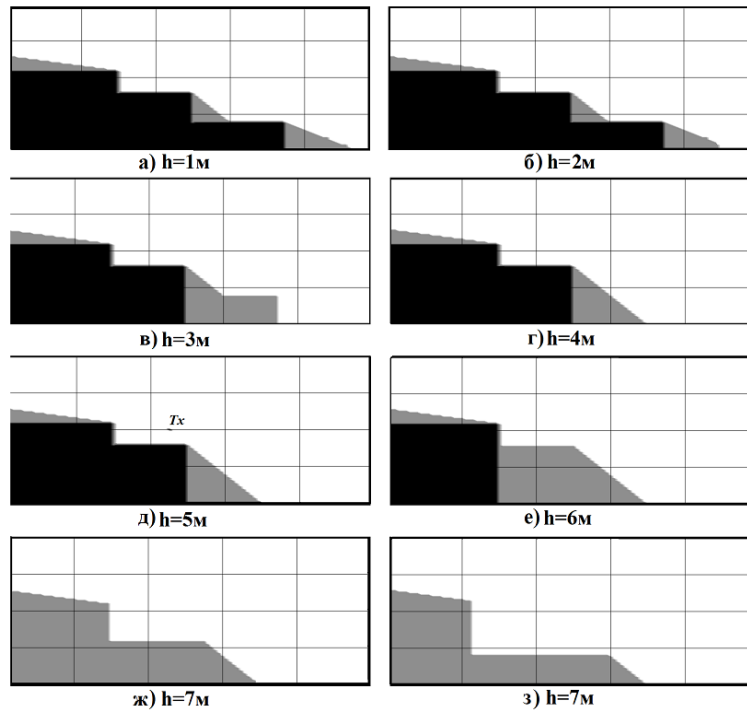


Рис. 5. Области тени для прямого луча на различной высоте

На рис. 6 представлены области тени, формируемые препятствиями для лучей, отраженных от одной из стен, на высоте, равной высоте расположения передатчика (5 м). Видно, что на этой высоте треть (самое маленькое) препятствие влияет только на формирование областей затенения для луча, отраженного от стен 3 и 5, т.е., тех стен, с которыми оно непосредственно соприкасается. На отражение от остальных стен это препятствие в данном случае не влияет, поскольку расположено ниже исследуемого сечения.

Анализ отражения от каждой стены по отдельности позволяет сделать выводы о корректности работы предложенного алгоритма и дает наглядное представление о формировании общей картины затенения в помещении, которая изображена на рис. 7

На рис. 7 представлены картины затенения, полученные для различных по высоте горизонтальных сечений помещения. Рис. 7,а,б иллюстрируют области тени, сформированные препятствиями для отраженных от стен лучей в области, расположенной ниже источника сигнала. В этой области существуют все три препятствия. Рис. 7,в соответствует сечению, в котором находится передатчик. Видно, что в сечениях, расположенных выше третьего препятствия, область наиболее глубокой тени формируется остальными двумя (рис. 7,в-д). Рис. 7,е иллюстрирует картину затенения, сформировавшуюся выше препятствий.

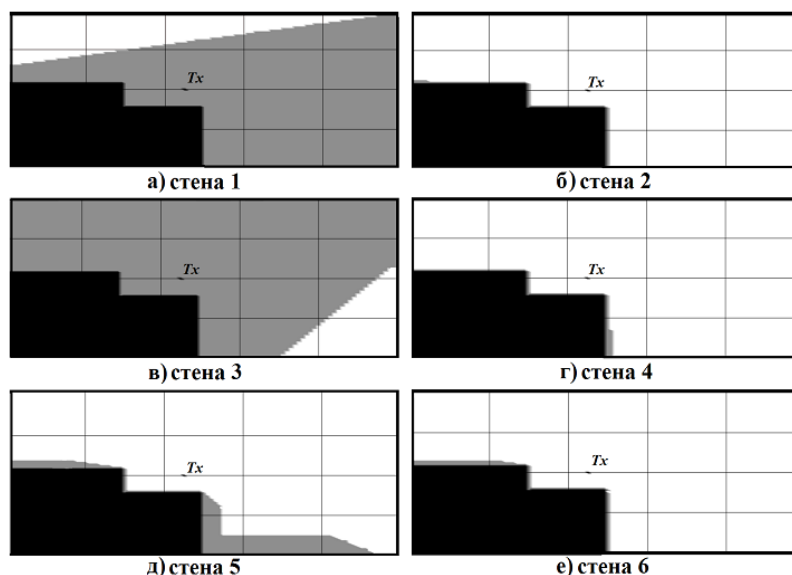


Рис. 6. Области тени для луча, отраженного от одной из стен

Анализ полученных результатов показывает, что они полностью соответствуют постулатам геометрической оптики, что свидетельствует о правильности работы предложенного алгоритма.

Полученные картины затенения объема помещения иллюстрируют, что область тени занимает значительную часть внутреннего пространства и ограничивающих поверхностей. Следовательно, использование предложенного алгоритма с целью исключения этих областей из анализа на этапе расчета интенсивности поля приведет к устранению из расчета лучей, не участвующих в формировании многолучевого канала радиосвязи в конкретной точке расположения приемника, и, следовательно, к снижению вычислительных ресурсов.

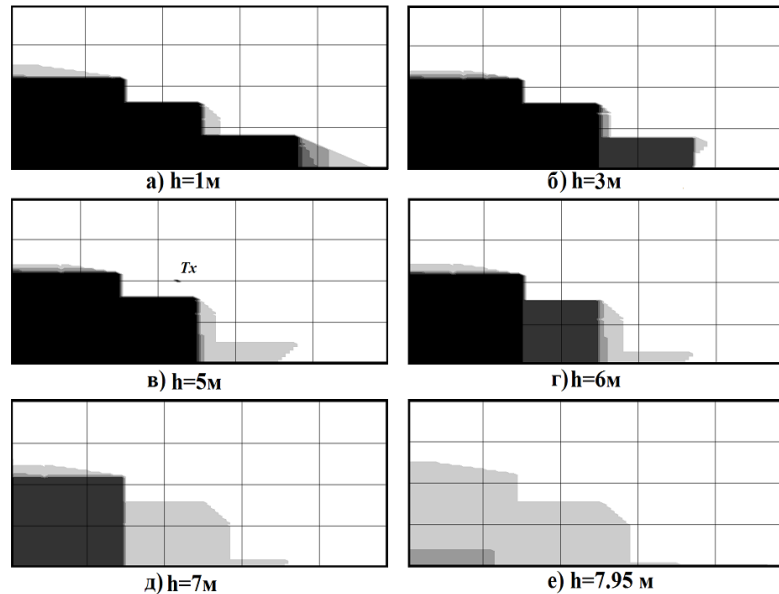


Рис. 7. Области тени для отраженного луча на различной высоте

Заключение. Таким образом, предложенный алгоритм трехмерной лучевой трассировки работоспособен в случаях, когда препятствие представляет собой группу выпуклых шестигранников. Действие алгоритма продемонстрировано на примере препятствия, имитирующего сложный рельеф поверхности одной из стен помещения. Получены области тени для прямого и для отраженных от стен лучей. Результаты моделирования полностью соответствуют постулатам геометрической оптики и свидетельствуют о правильности работы предложенного алгоритма.

Анализ приведенных результатов позволяет сделать вывод, что область тени занимает значительную часть как внутреннего пространства, так и ограничивающих поверхностей. Следовательно, использование предложенного алгоритма с целью исключения этих областей из анализа на следующем этапе – этапе расчета интенсивности поля – обеспечит снижение вычислительных ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Весник М.В.* Детерминированная теория распространения радиоволн в условиях городской застройки // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Междунар. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн – ИРЭМВ-2015» . – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. – С. 378-383.
2. *Dimitriou A.G., Bletsas A., Bessis N., Polycarpou A.C., Sahalos G.N.* Theoretical Findings and Measurements on Planning a UHF RFID System Inside a Room // *Radioengineering.* – June 2011. – Vol. 20, No. 2. – P. 387-397.
3. *Lay Z., De La Roche G., Bessis N., Kuonen P., Clapworthe G., Zhou D., Zhang G.* Statistical Intelligent Ray Launching Algorithm for Indoor Scenarios // *Radioengineering.* – June 2011. – Vol. 20, No. 2. – P. 398-408.
4. *Maltsev A., Maslennikov R., Lomayev A., Sevastyanov A., Khoryaev A.* Statistical Channel Model for 60 GHz WLAN Systems in Conference Room Environment // *Radioengineering.* – June 2011. – Vol. 20, No. 2. – P. 409-422.
5. *Пермяков В.А., Жексенов М.А.* Методы расчета распространения радиоволн в городе (обзор) // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Междунар. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн – ИРЭМВ-2009». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 36-40.

6. *Барабашов Б.Г., Дроган Ю.В., Пелевин О.Ю.* Расчет многолучевой структуры поля УКВ в городе // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2009. – № 4. – С. 42-44.
7. *Стрельницкий А.А., Стрельницкий А.Е., Цона А.И., Шокало В.М.* Теория и практика построения радиоканалов локальных беспроводных сетей с заданным качеством передачи информации // 18th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2008), 8-12 september 2008, Sevastopol, Crimea, Ukraine. – P. 3-9.
8. *Авдеев В.Б., Катруша А.Н.* Расчет и анализ многокомпонентного состава поля радиоволн на трассах распространения внутри зданий // Антенны. - 2007. - Вып. 4 (119). - С. 6-11.
9. *Madej P.* 3D Wireless Networks Simulator – Visualization of Radio Frequency Propagation for WLANs // Dissertation. Univ. of Dublin, Trinity College, 2006.
10. *Банков С.Е., Курушин А.А.* Расчет и моделирование распространения радиоволн в городской среде и пересеченной местности с помощью программы Wireless InSite // EDA Express. - 2004. - № 9. - С. 35-39.
11. *Милютин Е.Р. и др.* Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. - СПб.: Трида, 2003. – 159 с.
12. *Гуреев А.В., Кустов В.А.* Волноводная модель беспроводных каналов связи внутри зданий // Исследовано в России. - 2002. - № 2. - С. 1519-1536.
13. *O'Brien W., Kenny E., Culler P.* An efficient implementation of a three-dimensional microcell propagation tool for indoor and outdoor urban environments // IEEE Trans. Veh. Tech. – 2000. – Vol. 49, No. 2. – P. 622-630.
14. *Chung H.K. and Bertony H.L.* Rang-dependent path-loss model in residential areas for the VHF and UHF bands // IEEE Trans. on Anten. and Propag. – 2002. – Vol. 50, No. 1. – P. 1-11.
15. *Torres R.P. a.o.* CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless System in Enclosed Spaces // Antennas and Propagation Magazine. – 1999. – Vol. 41, No. 4. – P. 11-21.
16. *Пономарев Г.А., Куликов А.М., Тельпуховский Е.Д.* Распространение УКВ в городе. – Томск: МП «Раско», 1991. – 222 с.
17. *Grishchenko S.G., Kisel N.N.* Research of the Underlying Surface Model // 25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). – Sevastopol, Crimea, 6-12 September 2015. – Vol. 1. - P. 1126-1127.
18. *Grishchenko S.G., Kisel N.N.* Microwave Model of a Scatterer, located on the underlying surface // 25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). – Sevastopol, Crimea, 6-12 September 2015. – Vol. 1. - P. 1198-1199.
19. *Грищенко С.Г., Кисель Н.Н., Ваганова А.А.* Численный анализ многослойной модели земной поверхности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 105-116.
20. *Грищенко С.Г., Кисель Н.Н., Ваганова А.А.* Рассеяние электромагнитных волн телом вращения, расположенным на многослойном полупространстве // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С.141-150.
21. *Грищенко С.Г., Кисель Н.Н., Ткачёва А.С.* Электродинамические модели рассеивателей, находящихся вблизи плоской границы раздела сред // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2011. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 209-213.
22. *Грищенко С.Г.* Исследование характеристик рассеяния тел вращения произвольной формы в квазиоптической области // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1993. - Т. 36, № 2. - С. 69-72.
23. *Грищенко С.Г.* Рассеяние электромагнитной волны на теле вращения с многослойным покрытием в квазиоптической области // Радиотехника и электроника. – 1993. - Т. 38, № 8. - С. 1370-1378.
24. *Панычев А.И.* Анализ распространения сигналов ММО-системы в условиях ограниченного пространства // Рассеяние электромагнитных волн: Межвед. сб. науч.-техн. статей. Вып. 16. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2010. - С. 5-12.
25. *Панычев А.И.* Алгоритм трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). - С. 31-41.
26. *Панычев А.И.* Трассировка многолучевого распространения радиоволн внутри зданий // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР)»: Науч.-техн. сборник. – 2012. – Вып. 1. - С. 182-187.

27. Панычев А.И. Трехмерное моделирование зоны радиопокрытия WLAN в помещении // Техника радиосвязи. – 2014. – Вып. 2 (22). - С. 23-32.
28. Панычев А.И., Дубинская И.В. Синтез лучевой траектории проникновения сигналов WLAN в смежные помещения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5(142). - С. 116-122.
29. Panychev A.I., Vaganova A.A. Three-dimensional Tracing of WLAN Signals Between Rooms // 25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). - Sevastopol, Crimea, 6-12 September 2015. - Vol. 1. - P. 211-212.
30. Панычев А.И., Ваганова А.А. Синтез траектории лучевого преломления сигналов локальной беспроводной сети связи на элементах конструкций здания // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Междунар. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн – ИРЭМВ-2015». – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. - С. 396-400.

REFERENCES

1. Vesnik M.V. Determinirovannaya teoriya rasprostraneniya radiovoln v usloviyakh gorodskoy zastroйки [Deterministic theory of radio wave propagation in urban areas], *Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln: Trudy Mezhdunar. nauchn. konf. «Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln – IREMV-2015»* [Radiation and scattering of electromagnetic waves: proceedings of the International scientific conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves – IRANG-2015"]. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 378-383.
2. Dimitriou A.G., Bletsas A., Bessis N., Polycarpou A.C., Sahalos G.N. Theoretical Findings and Measurements on Planning a UHF RFID System Inside a Room, *Radioengineering*, June 2011, Vol. 20, No. 2, pp. 387-397.
3. Lay Z., De La Roche G., Bessis N., Kuonen P., Clapworthe G., Zhou D., Zhang G. Statistical Intelligent Ray Launching Algorithm for Indoor Scenarios, *Radioengineering*, June 2011, Vol. 20, No. 2, pp. 398-408.
4. Maltsev A., Maslennikov R., Lomayev A., Sevastyanov A., Khoryaev A. Statistical Channel Model for 60 GHz WLAN Systems in Conference Room Environment, *Radioengineering*, June 2011, Vol. 20, No. 2, pp. 409-422.
5. Permyakov V.A., Zheksenov M.A. Metody rascheta rasprostraneniya radiovoln v gorode (obzor) [Methods of calculation of radio wave propagation in the city (review)], *Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln: Trudy Mezhdunar. nauchn. konf. «Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln – IREMV-2009»* [the Radiation and scattering of electromagnetic waves: proceedings of the International scientific conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves – IRANG-2009"]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, pp. 36-40.
6. Barabashov B.G., Drogan Yu.V., Pelevin O.Yu. Raschet mnogoluchevoy struktury polya UKV v gorode [The calculation of the multipath structure of the field of VHF in the city], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki* [Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskii region. Natural Sciences], 2009, No. 4, pp. 42-44.
7. Strel'nitskiy A.A., Strel'nitskiy A.E., Tsopa A.I., Shokalo V.M. Teoriya i praktika postroeniya radiokanalov lokal'nykh besprovodnykh setey s zadannym kachestvom peredachi informatsii [Theory and practice of constructing radio channels, wireless local networks with a given quality of information transfer], *18th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2008), 8-12 september 2008, Sevastopol, Crimea, Ukraine*, pp. 3-9.
8. Avdeev V.B., Katrusha A.N. Raschet i analiz mnogokomponentnogo sostava polya radiovoln na trassakh rasprostraneniya vnutri zdaniy [Calculation and analysis of multicomponent composition field of the radio waves on the slopes of the propagation inside buildings], *Antenny* [Antennas], 2007, Issue 4 (119), pp. 6-11.
9. Madej P. 3D Wireless Networks Simulator – Visualization of Radio Frequency Propagation for WLANs, *Dissertation. Univ. of Dublin, Trinity College, 2006*.
10. Bankov S.E., Kurushin A.A. Raschet i modelirovaniye rasprostraneniya radiovoln v gorodskoy srede i persechennoy mestnosti s pomoshch'yu programmy Wireless InSite [The calculation and modeling of radio wave propagation in city environment and rough terrain using the Wireless InSite program], *EDA Express*, 2004, No. 9, pp. 35-39.

11. Milyutin E.R. i dr. Metody rascheta polya v sistemakh svyazi detsimetrovogo diapazona [Methods of calculation of field communication systems in the UHF range]. St. Petersburg: Triada, 2003, 159 p.
12. Gureev A.V., Kustov V.A. Volnovodnaya model' besprovodnykh kanalov svyazi vnutri zdaniy [Waveguide model of wireless communication channels inside buildings], *Issledovano v Rossii* [Investigated in Russia], 2002, No. 2, pp. 1519-1536.
13. O'Brien W., Kenny E., Culler P. An efficient implementation of a three-dimensional microcell propagation tool for indoor and outdoor urban environments, *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 2000, Vol. 49, No. 2, pp. 622-630.
14. Chung H.K. and Bertony H.L. Rang-dependent path-loss model in residential areas for the VHF and UHF bands, *IEEE Trans. on Anten. and Propag.*, 2002, Vol. 50, No. 1, pp. 1-11.
15. Torres R.P. a.o. CINDOOR: An Engineering Tool for Planning and Design of Wireless System in Enclosed Spaces, *Antennas and Propagation Magazine*, 1999, Vol. 41, No. 4, pp. 11-21.
16. Ponomarev G.A., Kulikov A.M., Tel'pukhovskiy E.D. Rasprostranenie UKV v gorode [The distribution of VHF in the city]. Tomsk: MP «Rasko», 1991, 222 p.
17. Grishchenko S.G., Kisel' N.N. Research of the Underlying Surface Model, *25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo '2015)*. Sevastopol, Crimea, 6-12 September 2015, Vol. 1, pp. 1126-1127.
18. Grishchenko S.G., Kisel' N.N. Microwave Model of a Scatterer, located on the underlying surface, *25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo '2015)*. Sevastopol, Crimea, 6-12 September 2015, Vol. 1, pp. 1198-1199.
19. Grishchenko S.G., Kisel' N.N., Vaganova A.A. Chislennyy analiz mnogosloynnoy modeli zemnoy poverkhnosti [Numerical analysis of earth surface multilayer model], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 105-116.
20. Grishchenko S.G., Kisel' N.N., Vaganova A.A. Rasseyaniye elektromagnitnykh voln telom vrashcheniya, raspolozhennym na mnogosloynom poluprostranstve [Scattering of electromagnetic waves by body of revolution located on multilayered half-space], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp.141-150.
21. Grishchenko S.G., Kisel' N.N., Tkacheva A.S. Elektrodynamichekieskie modeli rasseivateley, nakhodyashchikhsya vblizi ploskoy granitsy razdela sred [Electrodynamic model of the lens close to the flat border of section of environments], *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln» IREMV-2011* [Proceedings of International scientific conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves" IREPS-2011]. Taganrog: TTI YuFU, 2011, pp. 209-213.
22. Grishchenko S.G. Issledovanie kharakteristik rasseyaniya tel vrashcheniya proizvol'noy formy v kvaziopticheskoy oblasti [A study of scattering characteristics of bodies of revolution of arbitrary shape in a quasi-optical region], *Izvestiya vuzov. Radioelektronika* [Radioelectronics and Communications Systems], 1993, Vol. 36, No. 2, pp. 69-72.
23. Grishchenko S.G. Rasseyaniye elektromagnitnoy volny na tele vrashcheniya s mnogosloynnym pokrytiem v kvaziopticheskoy oblasti [Scattering of electromagnetic waves on a body of revolution with a multilayered coating in a quasi-optical region], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1993, Vol. 38, No. 8, pp. 1370-1378.
24. Panychev A.I. Analiz rasprostraneniya signalov MIMO-sistemy v usloviyakh ogranichenogo prostranstva [Analysis of signal propagation MIMO system in a limited space], *Rasseyaniye elektromagnitnykh voln: Mezhdved. sb. nauch.-tekhn. statey* [Scattering of electromagnetic waves: Interdepartmental collection of scientific.-technical articles], Issue 16. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2010, pp. 5-12.
25. Panychev A.I. Algoritm trekhmernoy trassirovki radiovoln lokal'noy besprovodnoy seti [The algorithm of three-dimensional trace radio waves wireless lan], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 31-41.
26. Panychev A.I. Trassirovka mnogoluchevogo rasprostraneniya radiovoln vnutri zdaniy [Tracing the effects of multipath propagation inside buildings], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya «Obshchie voprosy radioelektroniki (OVR)»: Nauchn.-tekhn. sbornik* [Questions of special radio electronics. A series of "General questions of radio electronics (OVR)": Scientific-technical collection], 2012, Issue 1, pp. 182-187.
27. Panychev A.I. Trekhmernoe modelirovaniye zony radiopokrytiya WLAN v pomeshchenii [Three-dimensional modeling of the zone of radio coverage of WLAN in the room], *Tekhnika radiosvyazi* [The technique of radio communications], 2014, Issue 2 (22), pp. 23-32.

28. Panychev A.I., Dubinskaya I.V. Sintez luchevooy traektorii proniknoveniya signalov WLAN v smezhnye pomeshcheniya [Synthesis of ray trajectory penetration WLAN signals in adjacent rooms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5(142), pp. 116-122.
29. Panychev A.I., Vaganova A.A. Three-dimensional Tracing of WLAN Signals Between Rooms, *25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015)*. - Sevastopol, Crimea, 6-12 September 2015, Vol. 1, pp. 211-212.
30. Panychev A.I., Vaganova A.A. Sintez traektorii luchevoogo prelomleniya signalov lo-kal'noy besprovodnoy seti svyazi na elementakh konstruksiy zdaniya [The synthesis of the trajectory of beam refraction signals lo-cal wireless communication network on the elements of building structures], *Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln: Trudy Mezhdunar. nauchn. konf. «Izluchenie i rasseyanie elektromagnitnykh voln – IREMV-2015»* [Radiation and scattering of electromagnetic waves: proceedings of the International scientific conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves – IRANG-2015"]. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2015, pp. 396-400.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Бутенко.

Панычев Андрей Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: ruu2011@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Ваганова Анастасия Алексеевна – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; магистрант.

Panychev Andrey Ivanovich – Southern Federal University; e-mail: ruu2011@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; the department of antenna and radio transmitter units; cand. of eng. sc.; associate professor.

Vaganova Anastasia Alekseevna – e-mail: anastasia_vaganova@mail.ru; master student.

УДК 621.396.93

Н.Н. Кисель

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВНУТРИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В связи с расширением функциональных возможностей мобильных средств связи и существенного увеличения времени их использования абонентами в течение дня возрастает внимание к исследованию по определению степени влияния электромагнитного воздействия на пользователя. Создание адекватной электродинамической модели биологической ткани для исследования влияния СВЧ-колебаний связано с необходимостью решения задачи о возбуждении электромагнитной волны в среде с резко меняющимися параметрами (кожа, мышцы, кости, жировая ткань). При этом характерные неоднородности оказываются соизмеримыми с длиной волны или меньше ее, из-за чего применение ряда приближенных асимптотических методов решения соответствующих модельных задач оказывается практически невозможным. Строгий расчет поля внутри человека можно выполнить только на основе трехмерного моделирования биологической среды с произвольными параметрами диэлектрической проницаемости ϵ и проводимости σ , что лежит на пределе возможностей самой современной вычислительной техники. В работе проведены исследования для упрощенных электродинамических моделей биологической ткани, в частности, в виде многослойной среды с плоскими слоями, а также многослойной сферы или эллипсоида. Для описания модели головы более предпочтительными являются модели, построенные на основе многослойных сфер или эллипсоидов, внутри которых расположен объем более сложной конфигурации, описывающей мозг. В работе рассмотрен случай трехслойной модели головы человека в виде эллипсоида вращения с усеченным эллипсоидом внутри для описания мозга человека и двух моделей сотового телефона с микрополосковой антенной и со