

**Грищенко Сергей Григорьевич** – радиотехнический факультет; декан; к.т.н.; доцент.

**Кардос Денис Александрович** – радиотехнический факультет, магистрант

**Kisel' Natalia Nikolayevna** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University” e-mail: dekanat-rtf@tti.sfedu.ru; GSP-17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Grishchenko Sergey Grigorievich** – the college of radio engineering; dean; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kardos Denis Alexandrovich** – the college of radio engineering, Master's Degree student.

УДК 621.396.98

**А.И. Панычев**

### **АЛГОРИТМ ТРЕХМЕРНОЙ ТРАССИРОВКИ РАДИОВОЛН ЛОКАЛЬНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ**

*Для модели многолучевого распространения сигналов локальной беспроводной сети внутри помещения предложен алгоритм трехмерной трассировки лучей, основанный на детерминистском подходе и базирующийся на методах геометрической оптики, геометрической теории дифракции и зеркального изображения. Алгоритм предусматривает представление помещения в виде набора модулей, каждый из которых является кластером, объединяющим типичные элементы конструкции зданий. В каждом модуле производится предварительное описание условий, формирующих области тени для лучей различной структуры. Это позволяет без расчета траектории луча дать ответ на вопрос о его существовании в выбранной точке объема помещения и тем самым существенно сократить вычислительные ресурсы, как на этапе трассировки, так и при расчете энергетических характеристик лучей.*

*Представлены результаты трехмерной трассировки в помещении с препятствием в виде прямоугольной колонны. Проведено сравнение распределений ослабления сигналов, рассчитанных разными способами. При сопоставимых качественных и количественных характеристиках полученных результатов выигрыш по времени в сравнении с типичной программой моделирования радиотрассы внутри здания составил приблизительно 5 раз.*

*Алгоритм; многолучевое распространение; трассировка лучей; метод геометрической оптики; геометрическая теория дифракции; метод зеркального изображения.*

**A.I. Panychev**

### **THE ALGORITHM OF THREE-DIMENSIONAL TRACE RADIO WAVES WIRELESS LAN**

*An algorithm for the three-dimensional ray tracing for the model of multipath propagation of signals the wireless local area network system indoor is proposed. It is based on deterministic approach and used the methods of geometrical optics, geometrical theory of diffraction and mirror image. The algorithm provides for the representation of space in the form of a set of modules, each of which is a cluster of uniting typical structural elements of buildings. Each module is made preliminary description of the shadow formation conditions for the rays of different structures. This allows without formation of the beam path to give an answer to the question about its existence in the selected point of the room volume and thus strongly reduce computing resources as at the stage of the trace, so when calculating the energy characteristics of radiation.*

*The results of three-dimensional trace in the room with an obstacle in the form of rectangular columns are presents. The comparison of the allocations to the weakening of the signal, calculated in different ways. At comparable qualitative and quantitative characteristics of the obtained results the winning of time in comparison with the typical radio channel simulation program inside the building amounted to approximately 5 times.*

*Algorithm; multi-path propagation; rays tracing; geometrical optics method; geometric theory of diffraction; the method of a mirror image.*

**1. Введение.** Повсеместно внедрение беспроводных систем связи обуславливает повышенный интерес к приближенным методам расчета поля в условиях многолучевого распространения радиоволн как вне, так и внутри зданий [1–3]. На основе известных статистических и детерминистских методов создан ряд специализированных программ расчета поля в системах связи внутри и вне зданий, обеспечивающих наглядную визуализацию результатов расчета, возможность использования геоинформационных баз данных, развитый интерфейс пользователя [4–6]. Большинство этих программных средств базируется на универсальном методе сканирующих лучей, следствием чего являются известные ограничения их применения:

- ◆ ориентированность на решение задачи покрытия зоны обслуживания, что делает излишне трудоемким расчет интенсивности поля в заданной точке;
- ◆ упрощенный учет поляризационных эффектов при отражениях и дифракции радиоволн;
- ◆ направленные и поляризационные характеристики задаются для передающей антенны, приемная антенна не конкретизируется;
- ◆ ограниченный набор базовых методов анализа многолучевой структуры, ориентированных в основном на двумерные случаи;
- ◆ значительные затраты времени на решение задачи и плохая приспособленность к оптимизации расчета.

Другим интенсивно развивающимся направлением исследований в системах связи дециметрового и сантиметрового диапазонов является построение моделей многолучевого распространения радиоволн внутри и вне зданий, в которых выделяется преобладающая в конкретных условиях компонента электромагнитного поля и анализируются геометрические особенности ее распространения [7–15]. Однако для этих разработок характерна слабая приспособленность к анализу объемных распределений напряженности поля.

Предлагаемый алгоритм позволяет производить полную трехмерную трассировку многолучевого распространения радиоволн локальной беспроводной системы связи. Алгоритм является первым этапом расчета комплексной амплитуды электромагнитного поля в точке приема.

**2. Процедура расчета интенсивности сигнала.** Для определения интенсивности сигнала на входе приемного оборудования абонента локальной беспроводной сети, находящегося внутри помещения, можно использовать известное выражение для комплексного коэффициента передачи линии связи [16], которое в результате адаптации примет вид

$$h = \sqrt{D^t D^r F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t) F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r) L_0 L^{pol} L^t L^r V},$$

где индекс «0» относится к прямому лучу; индексами «t» и «r» снабжены геометрические параметры передатчика и приемника, соответственно; все компоненты формулы вычисляются на рабочей длине волны генератора передающей станции  $\lambda^t$ ;  $D^t$  и  $D^r$  – максимальные значения коэффициентов направленного действия передающей и приемной антенн;  $F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t)$  и  $F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r)$  – выборки из нормированных диаграмм направленности в направлении на другую антенну;  $L_0 = \frac{\lambda^t e^{-jkR_0}}{4\pi R_0}$  –

множитель, учитывающий основное ослабление сигнала на радиолинии длиной  $R_0$ ;  $k$  – коэффициент распространения радиоволн на рабочей частоте;  $L^{pol}$  – поляризационный коэффициент передачи, определяющий степень рассогласования передающей и приемной антенн по поляризации;  $L^t$  и  $L^r$  – множители, определяющие затухание радиосигнала в передающем и приемном элементах вследствие омических потерь и рассогласования антенн с линиями передачи;  $V$  – множитель влияния среды, учитывающий многолучевой характер распространения сигнала.

Таким образом, отражения радиоволн от внутренних поверхностей помещения, прохождение сигналов сквозь конструкции здания и из соседних помещений, дифракция радиоволн на изломах конструктивных элементов зданий вводится в расчет в виде множителя влияния среды распространения:

$$V = 1 + \sum V^{refr} + \sum V^{pass} + \sum V^{diffr}.$$

Выражение для компонента множителя влияния среды, учитывающего отражения от поверхностей помещения и расположенных в нем объектов, можно получить на основе известной электродинамической модели распространения радиоволн над подстилающей поверхностью [18]:

$$\begin{aligned} \sum V_{\parallel, \perp}^{refl} = & \sum_s R_{\parallel, \perp, s}(\vartheta_s) \xi_s \frac{F^t(\theta_s^t, \varphi_s^t) R_0}{F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t) R_s} e^{-jk \Delta R_s} \frac{F^r(\theta_s^r, \varphi_s^r)}{F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r)} + \\ & + \sum_s \sum_{\substack{p \\ p \neq s}} R_{\parallel, \perp, s}(\vartheta_{sp}) R_{\parallel, \perp, p}(\vartheta_{sp}) \xi_{sp} \frac{F^t(\theta_{sp}^t, \varphi_{sp}^t) R_0}{F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t) R_{sp}} e^{-jk \Delta R_{sp}} \frac{F^r(\theta_{sp}^r, \varphi_{sp}^r)}{F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r)} + \\ & + \sum_s \sum_{\substack{p \\ p \neq s}} \sum_{\substack{q \\ p \neq s, q \neq p}} R_{\parallel, \perp, s}(\vartheta_{spq}) R_{\parallel, \perp, p}(\vartheta_{spq}) R_{\parallel, \perp, q}(\vartheta_{spq}) \xi_{spq} \times \\ & \times \frac{F^t(\theta_{spq}^t, \varphi_{spq}^t) R_0}{F^t(\theta_0^t, \varphi_0^t) R_{spq}} e^{-jk \Delta R_{spq}} \frac{F^r(\theta_{spq}^r, \varphi_{spq}^r)}{F^r(\theta_0^r, \varphi_0^r)} + \dots, \end{aligned}$$

где  $s, p, q, \dots$  – номера поверхностей, от которых последовательно отражается луч, комбинация  $spq \dots$  задает структуру (ход) луча многократного отражения от внутренних поверхностей помещения;  $\theta_{spq}^t, \varphi_{spq}^t$  – углы выхода лучей из передающей антенны;  $\theta_{spq}^r, \varphi_{spq}^r$  – углы прихода лучей к приемной антенне;  $\xi_{spq}$  – коэффициент, учитывающий деполяризационные эффекты при отражениях луча;  $\vartheta_{spq}$  – углы падения луча на отражающие поверхности (учитываются обе попеременные составляющие в поле излучающей антенны: параллельно (индекс « $\parallel$ ») и нормально (индекс « $\perp$ ») поляризованные);  $\Delta R_{spq} = R_{spq} - R_0$  – разность хода отраженного и прямого лучей.

Таким образом, аналитическое выражение для множителя влияния среды определяется конкретными геометрическими параметрами канала связи, формирующими пространственные условия распространения каждой из радиоволн, входящих в многолучевую модель. Вследствие этого на этапе построения лучевых траекторий для каждого геометрического параметра луча необходимо иметь аналитическое описание или, по крайней мере, простой универсальный алгоритм быстрого расчета.

**3. Общее описание алгоритма лучевой трассировки.** Базовые положения предлагаемого алгоритма трехмерной трассировки лучей в помещении следующие [19]:

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

2) Реальные объекты, присутствующие в существенной для распространения радиоволн области, моделируются простейшими геометрическими телами, для которых известны решения модельных задач отражения и дифракции.

3) Используется принцип модульности внутреннего пространства здания, в соответствии с которым весь объем разделяется на отдельные кластеры, обладающие характерными геометрическими чертами. Простейшим кластером является полый прямоугольный параллелепипед, моделирующий комнату, холл, коридор, ангар. Трехмерная трассировка лучей в таком модуле описана в [16].

Другие варианты кластеров образуются на основе базового. Так, несущие конструкции здания моделируются круговым цилиндром, произвольным шестигранником, призмами с различным основанием и другими телами. Наличие дверных и оконных проемов учитывается вырезами прямоугольной или арочной формы. Лестничные марши аппроксимируются наклонной гребенчатой структурой. Для каждого изолированного кластера выполняется лучевая трассировка радиоволн, учитывающая его геометрические особенности.

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. Это позволяет исключить из рассмотрения те области пространства, где луч данной структура отсутствует, и тем самым оптимизировать процедуру трассировки лучей.

**4. Базовые элементы алгоритмов трассировки отраженных, дифракционных и преломленных лучей.** Трассировка лучей в кластере опирается на базовые алгоритмы, которые можно разделить на несколько групп.

1) Алгоритмы, реализующие известные соотношения аналитической геометрии. 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.

2) Алгоритмы, определяющие взаимное расположение точки (передатчика или приемника) и препятствия:

- ◆ 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.

3) Алгоритмы, формирующие области пространства, занятые тенью от препятствия для луча выбранной структуры.

Алгоритмы этой группы базируются на процедуре построения области тени за некоторой плоской фигурой, 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.

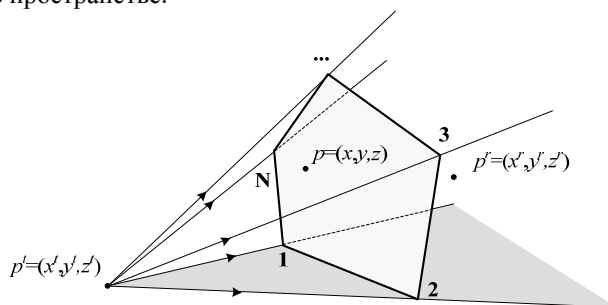


Рис. 1. К алгоритму формирования тени, образуемой плоским многоугольником

На первом шаге проверяется, расположены ли точки  $p^l$  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  $p^l$  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.

Алгоритмы формирования препятствием области тени для лучей различной природы и структуры без потери общности можно проиллюстрировать геометрическими построениями в одной из характерных плоскостей, например, в плоскости  $z=\text{const}$  (рис 2). Рассмотрим процедуры выделения области пространства, занятой тенью, отбрасываемой различными лучами.

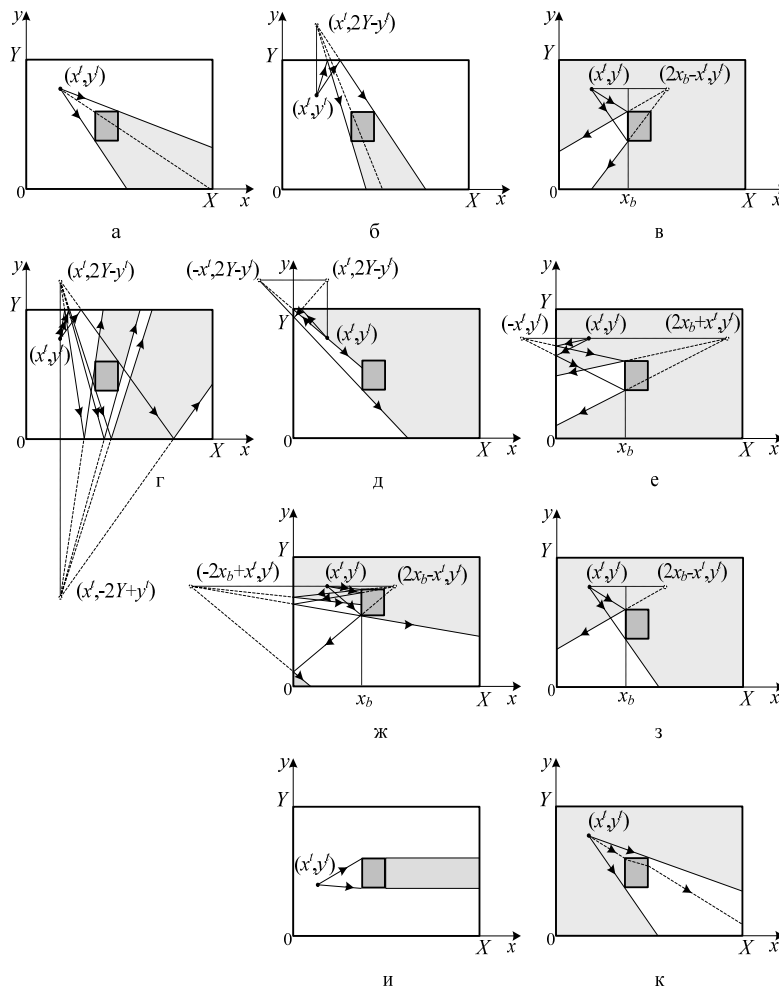


Рис. 2. Области тени для лучей различной структуры

1) Прямые лучи (рис. 2,а). Алгоритм включает следующие шаги:

- ◆ определяются все освещенные прямыми лучами грани объекта;
- ◆ для каждой освещенной грани формируется область отбрасываемой ею тени;
- ◆ все полученные области пространства объединяются.

2) Лучи однократного отражения от стены (рис. 2,б). Используется алгоритм для прямых лучей, но в качестве источника задается зеркальное изображение точки передатчика относительно отражающей стены.

3) Лучи однократного отражения от грани препятствия (рис. 2,в). Алгоритм применяется для каждой освещенной грани и состоит в следующем:

- ◆ отыскивается зеркальное изображение точки передатчика относительно этой грани;
- ◆ для полученной точки формируется область отбрасываемой гранью тени;
- ◆ условие существования тени инвертируется.
- ◆ сформированные таким образом области пространства для всех освещенных граней объединяются (на рис. 2,в лучевая трассировка выполнена только для одной из освещенных граней).

4) Лучи двукратного отражения от противоположных стен (рис. 2,г). В этом случае виртуальным источником лучей является точка, полученная в результате двукратного построения зеркального изображения: сначала для истинной точки передатчика относительно стены первого отражения, а затем для этого «зеркального источника» относительно стены второго отражения. Тень для луча такой структуры состоит из двух областей пространства, каждая из которых формируется по алгоритму тени для прямых лучей: первая образована препятствием, вторая – пятном тени для лучей первого отражения на поверхности второго отражения, и соответствует части пространства, где лучи двукратного отражения не порождаются. Эти области могут частично и даже полностью накладываться одна на другую.

Очевидно, что для общего случая многократного отражения от противоположных стен количество частей итоговой тени совпадает с числом отражений, при этом «мертвые» зоны на отражающих поверхностях для лучей второго и следующих отражений могут быть сформированы по рекуррентному алгоритму.

5) Лучи двукратного отражения от смежных стен (рис. 2,д). Как и в предыдущем случае, виртуальный источник лучей получается в результате последовательного построения зеркального изображения точки передатчика относительно рассматриваемых стен. Тень также образована двумя областями: первая формируется препятствием, а вторая ограничена «предельным» лучом, дважды отразившимся на стыке стен, и определяет часть пространства, где лучи такой структуры не порождаются. Эта часть тени определяется местом положения передатчика и не зависит от расположения препятствия.

6) Лучи двукратного отражения типа стена – грань препятствия (рис. 2,е). Процедура формирования области тени повторяет алгоритм 3), в котором источник получен двойным зеркальным отображением точки передатчика последовательно относительно плоскости стены и плоскости грани.

7) Лучи двукратного отражения типа грань препятствия – стена (рис. 2,ж). Алгоритм построения тени совпадает со случаем 4) с одним отличием – первое зеркальное изображение точки передатчика строится относительно плоскости грани препятствия.

8) Лучи однократной дифракции на ребрах препятствия (рис. 2,з). Область пространства, в которой могут существовать такие лучи, ограничена двумя соответствующими крайним точкам кромки конусами дифракционных лучей и примыкающими к кромке гранями препятствия. Поскольку угол раствора конуса дифракцион-

ных лучей равен углу между ребром и падающим лучом, алгоритм трассировки для рассматриваемых лучей является комбинацией алгоритмов 1) и 3). На ближнем к источнику волн конце ребра угол раствора конуса соответствует отраженному прямому лучу, а на дальнем конце – коснувшемуся кромки прямому лучу.

9) Лучи однократной дифракции на вершине препятствия (рис. 2,и). При падении луча на острие пучок порожденных дифракционных лучей является изотропным, следовательно, область тени для них образуется пересечением внутренних полуплоскостей всех прилегающих к рассматриваемой вершине граней.

10) Лучи, прошедшие сквозь препятствие (рис. 2,к). Вблизи стыка двух смежных граней ход луча, преломленного одной гранью и вышедшего из соседней, практически совпадает с трассой прямого луча, коснувшегося общего ребра этих граней. Следовательно, алгоритм построения области тени для прошедших сквозь препятствие лучей состоит в применении алгоритма 1) с последующей инверсией выработанного условия.

Как видно, в общем случае область тени занимает значительную часть как внутреннего пространства, так и ограничивающих поверхностей. Следовательно, исключение этих областей из анализа на следующем этапе расчета поля способно обеспечить существенное снижение временных затрат.

**5. Трассировка лучей в базовом кластере.** Одним из базовых кластеров является полый прямоугольный параллелепипед с произвольно расположенным внутренним препятствием в виде шестигранника (рис. 3) [20].

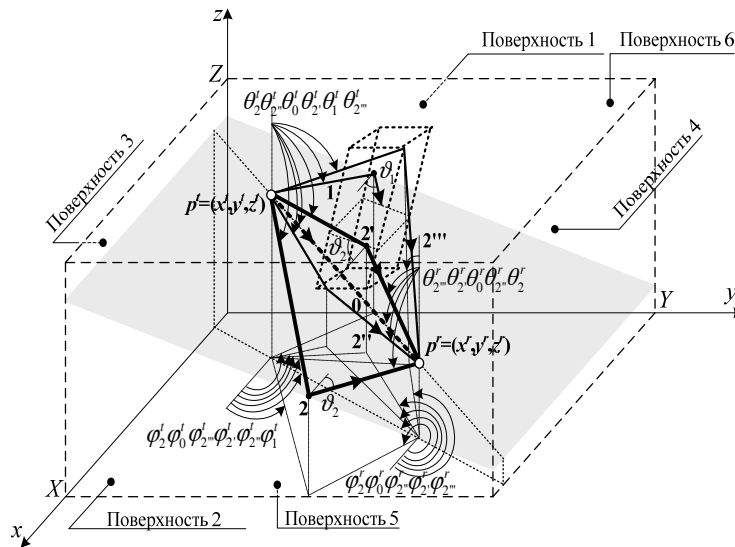


Рис. 3. Основные геометрические параметры кластера

Шестигранник может служить моделью различных конструктивных элементов здания: 1) несущей колонны, если по высоте соответствует помещению; 2) несущей балки, когда имеет соответствующие пропорции и расположено у потолка; 3) постамента, если расположено на полу; 4) поворота коридора, когда по высоте совпадает с помещением и локализовано в его углу; 5) различных табло и световых конструкций, когда занимает произвольное положение внутри объема кластера. Индексы «1», «2», «2'» обозначают отражающие грани помещения и препятствия (со штрихом). На рис. 3 также представлены трассы распространения некоторых характерных лучей: прямого луча (0); лучей однократного отражения



от стены (2) и от препятствия (2'); луча, отраженного от стены, но затененного препятствием (1); дифракционного луча на ребре препятствия (2''); дифракционного луча на вершине препятствия (2''').

Рис. 4–6 иллюстрируют применение описанного алгоритма трехмерной лучевой трассировки для указанного кластера. Размеры помещения: длина  $X=40$  м, ширина  $Y=20$  м, высота  $Z=8$  м, препятствие имеет форму прямоугольного параллелепипеда  $3 \times 3 \times 2$  м с ближайшей к началу координат вершиной (18,5, 8,5, 4) м. Координаты точки расположения передатчика  $p^t=(10, 1, 7)$  м.

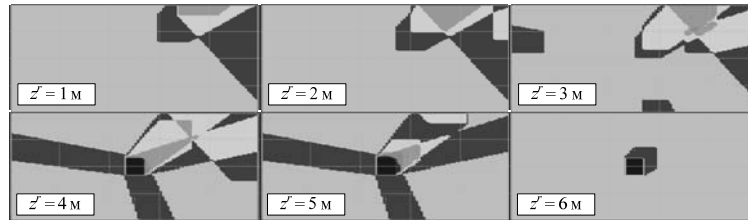


Рис. 4. Области тени для лучей однократного отражения от поверхностей помещения на различной высоте

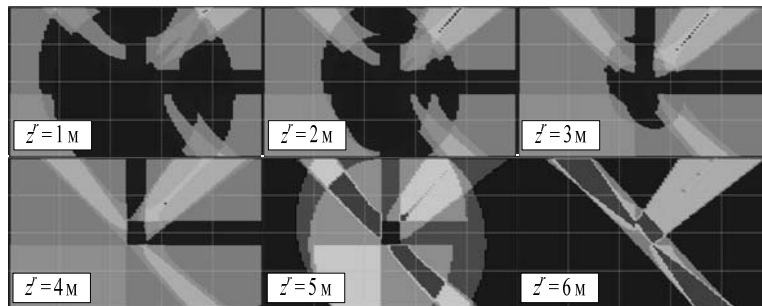


Рис. 5. Области тени для лучей однократной дифракции на ребрах препятствия на различной высоте

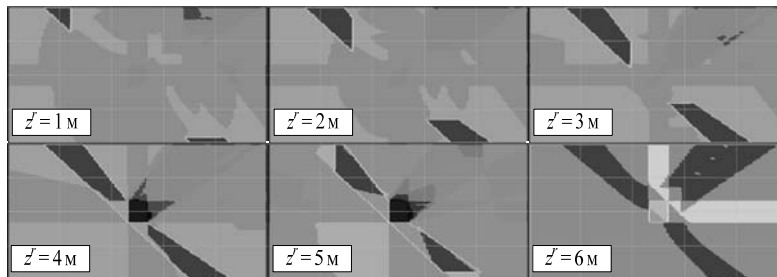


Рис. 6. Картина тени для всех учитываемых лучей на различной высоте

Картина тени для лучей, однократно отраженных от внутренних поверхностей помещения (рис. 4), характеризуется областями пространства, в которых одновременно существуют волны, отразившиеся от нескольких поверхностей (максимально – от всех шести). Наиболее сложная структура зон видимости и тени складывается для лучей однократной дифракции на ребрах препятствия (рис. 5). Это объясняется, во-первых, большим числом участвующих в дифракции ребер

(до девяти), во-вторых, сложной пространственной картиной наложения пучков дифракционных лучей. Очевидно, что суммарные теневые зоны, сформированные перекрытием лучей до второй кратности отражения от поверхностей помещения и препятствия и лучей однократной дифракции на препятствии (рис. 6), характеризуются более равномерным распределением интенсивности сигналов с преобладанием полутеневых областей.

Как указывалось выше, в расчетах покрытия зоны обслуживания беспроводной сети предложенный алгоритм позволяет сократить вычислительные затраты на этапе лучевой трассировки. На рис. 7 приведены распределения ослабления сигналов, полученные с использованием описанного алгоритма средствами Mathcad 14 (верхний ряд) и с помощью программы Wireless Insite (нижний ряд). Распределения представлены для горизонтальной плоскости, пересекающей препятствие, учтены прямые лучи и лучи однократного отражения и дифракции, рабочая частота 2,4 ГГц, передающая и приемная антенны – горизонтальные симметричные полу-волновые вибраторы, материал стен – бетон, материал препятствия – стекло. Рис. 7,а соответствует случаю, когда оба вибратора параллельны и ориентированы вдоль оси  $x$ , рис. 7,б – приемный вибратор перпендикулярен передающему и направлен вдоль оси  $y$ .

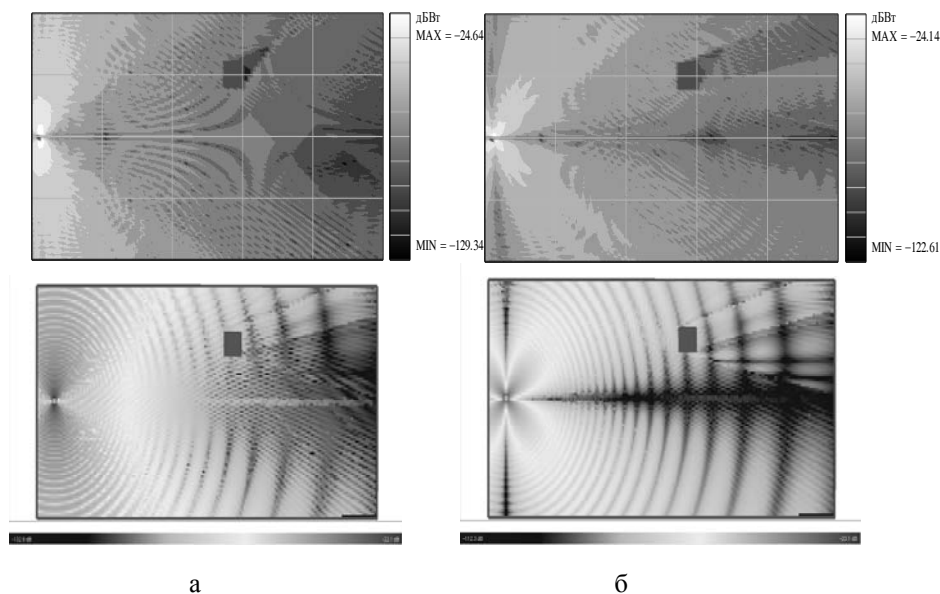


Рис. 7. Сравнение расчетов различными способами интенсивности сигналов локальной беспроводной сети связи

Временные затраты моделирования по первому алгоритму в обоих случаях составили около 8,5 с, расчет в программе Wireless Insite длился около 40 с, что подтверждает эффективность предложенного алгоритма трассировки. Уровни ослабления сигналов, полученные обоими способами, практически не отличаются и соответствуют диапазону  $-24 \dots -130$  дБВт. Распределения сигналов имеют подобную качественную картину, однако иллюстрации верхнего ряда в большей степени приближены к измеряемым картинам.

**Заключение.** Предложенный алгоритм трехмерной трассировки лучей в помещении с типичными элементами конструкции здания позволяет выделить области пространства, где лучи соответствующей структуры отсутствуют, и тем са-

мым существенно сократить вычислительные затраты на этапе расчета энергетических характеристик лучей. Рассчитанные распределения ослабления сигналов локальной беспроводной сети связи в помещении полностью соответствуют постулатам геометрической оптики и геометрической теории дифракции.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Милютин Е.Р. и др. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона. - СПб.: Трида, 2003. – 159 с.
2. 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.
3. Пономарев Г.А., Куликов А.М., Тельпуховский Е.Д. Распространение УКВ в городе. – Томск: МП «Раско», 1991.
4. 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.
5. Madej P. 3D Wireless Networks Simulator – Visualization of Radio Frequency Propagation for WLANs // Dissertation. Univ. of Dublin, Trinity College, 2006.
6. 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, № 4. – P. 11-21.
7. 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. – 2011. – Vol. 20, № 2. – P. 387-407.
8. 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. – 2011. – Vol. 20, № 2. – P. 398-408.
9. Maltsev A., Maslennikov R., Lomayev A., Sevastyanov A., Khoryaev A. Statistical Channel Model for 60 GHz WLAN Systems in Conference Room Environment // Radioengineering. – 2011. – Vol. 20, № 2. – P. 409-422.
10. 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.
11. 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 // 18<sup>th</sup> Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2008), 8-12 september 2008, Sevastopol, Crimea, Ukraine. – P. 3-9.
12. Авдеев В.Б., Камруша А.Н. Расчет и анализ многокомпонентного состава поля радиоволн на трассах распространения внутри зданий // Антенны. – 2007. – Вып. 4 (119). – С. 6-11.
13. Гуреев А.В., Кустов В.А. Волноводная модель беспроводных каналов связи внутри зданий // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2002. – № 2. – С. 1519-1536.
14. 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, № 2. – P. 622-630.
15. 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, № 1. – P. 1-11.
16. Паньчев А.И. Оценка величины элементов канальной матрицы системы ММО беспроводной связи внутри помещений // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Междунар. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн – ИРЭМВ-2009». – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – С. 416-420.
17. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
18. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: – М.: Радио и связь, 2000. – 559 с.

19. Панычев А.И. Алгоритм трассировки лучей внутри зданий // Излучение и рассеяние электромагнитных волн: Труды Междунар. научн. конф. «Излучение и рассеяние электромагнитных волн – ИРЭМВ-2011». – Таганрог: Изд-во ГТИ ЮФУ, 2011. – С. 371-375.
20. Панычев А.И. Трассировка многолучевого распространения радиоволн внутри зданий // Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия «Общие вопросы радиоэлектроники (ОВР)». Научн.-техн. сборник. Вып. 1. – М.-Таганрог, 2012. – С. 182-187.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

**Панычев Андрей Иванович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: andrey\_panychev@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

**Panychev Andrey Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: andrey\_panychev@mail.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК621.396.677

**А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина, С.Н. Сергеев, С.Н. Носаков**

#### **ШИРОКОПОЛОСНЫЕ КОМПАКТНЫЕ МИКРОПОЛОСКОВЫЕ АНТЕННЫ С ЕМКОСТНЫМ МИКРОПОЛОСКОВЫМ ПИТАНИЕМ**

*Рассмотрены три модели широкополосных компактных микрополосковых антенн (МПА) с радиопрозрачным обтекателем для работы в полосе частот 1,2...1,65 ГГц. Они отличаются различной формой кольцевого излучающего полоска и слабой емкостной связью с микрополосковой линией (МПЛ) питания. Каждая антенна содержит подвешенную подложку FR4 с излучающим и питающим полосками и нижнюю подложку FR4 с МПЛ и широкополосным переходом от МПЛ к питающему полоску. В полосе частот 37,5 % они имеют КСВН не более 2,8–3,9; коэффициент усиления 4,4–6,8 дБ и размеры 87,2 мм×80 мм×28,3 мм. Экспериментальные исследования макета МПА подтвердили приведенные оценки характеристик антенны.*

*Компактная микрополосковая антенна; широкополосность; емкостное питание; питающая микрополосковая линия; обтекатель.*

**A.I. Semenikhin, D.V. Semenikhina, S.N. Sergeev, S.N. Nosakov**

#### **WIDEBAND COMPACT MICROSTRIP ANTENNA WITH CAPACITANCE MICROSTRIP FEEDING**

*We consider three models of compact wideband microstrip antennas (MSA) with radome to operate in the frequency range 1.2 to 1.65 GHz. They are characterized by different forms of ring-radiating patch and a weak capacitive coupling with the feeder microstrip line. Each antenna has a suspended substrate FR4 with radiator patch and feed strip and a lower substrate FR4 with the microstrip line and broadband transition from the microstrip line to the feeder strip. They have VSWR less than 2.8–3.9, the maximum realized gain 4.4–6.8 dBi, and the sizes 87.2 mm×80 mm×28.3 mm in the band 37.5 %. The experimental study of the prototype, manufactured by model 1, confirmed the estimates of achievable antenna performance.*

*Compact microstrip antenna; widebandness; capacitive coupling; feeder microstrip line; radome.*

Компактные микрополосковые антенны (МПА) с широкой и сверхширокой полосой частот применяются при построении антенн спутниковых систем навигации GLONASS/GPS/Galileo [1]. Конструкции МПА могут содержать усилитель и