

[9] Stepanov S.Yu. Slojnaya informatsionnaya sistema prognozirovaniya riskov s primeneniem filtra Kalmana – Byusi / Istomin Ye.P., Novikov V.V., Sidorenko A.Yu., Kolbina O.N., Stepanov S.Yu. // Uchene zapiski RGGMU, vpusk 36, RGGMU, 2014. – 212 с., ISSN 2074-2762

[10] B.N. Rakhimov, X.A. Muxitdinov, Z.T. Xakimov, D.B. Ibragimov, Optoelectronic measuring and information system for the detection efforts of dams // Perspectives for the development of information technologies ИТА-2014, pp. 347-351, November 2014.

[11] N.R. Rakhimov, B.R. Rakhimov, "Determination of the location of objects of mechanical damage based on fiber-optical sensors", Modern technologies in oil and gas business – 2017 international scientific and technical conference, pp. 184-188, 2017.

[11] A.A. Berdiev. Prognozirovanie dinamicheskix i statisticheskix svoystv podzemnx truboprovodov v usloviyax «Bezopasny gorod». “Muhammad al-Xorazmiy avlodlari” ilmiy-amaliy va axborot tahliliy jurnal. 2(2)/2017. –S. 76-80 (Prediction of dynamic and statistical properties of underground pipelines in the conditions of "Safe City").

[12] Nematjon R. Rakhimov; Bakhtiyorjon N. Rakhimov; Alisher A. Berdiyev. «Locate Objects Mechanical Damage Based on Fiber-Optic Communication Systems» 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) 2-6 Oct. 2018.

[13] Bakhtiyorjon N. Rakhimov ; Alisher A. Berdiyev; Doniyor B. Ibragimov; Guzal E. Zoxidova. «Forecasting Dynamic and Statistical Properties of Underground Pipelines

Under Conditions of “Safe City”» 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE) 2-6 Oct. 2018.

Рахимов Тохир Гофурович – кандидат технических наук, Ташкентский университет информационных технологий, г.Ташкент, Республика Узбекистан, Тел.: +998(99) -858-35-35.

Бердиев Алишер Аликулович – докторант, Ташкентский университет информационных технологий, г.Ташкент, Республика Узбекистан, Тел.: +998(99)828-57-02.

E-mail: berdivevalisher18@gmail.com

Ибрагимов Дониёр Бахтиярович – ассистент, Ташкентский университет информационных технологий, г.Ташкент, Республика Узбекистан

Ўлмасхужаев Зоирхўжа – магистрант, Ташкентский университет информационных технологий, г.Ташкент, Республика Узбекистан, Тел.: +998(98)300-00-78.

The synchronization problems in the application to a multi-channel distributed information-measuring system, combining a set of instruments or sensors for registering dissimilar physical parameters of radio monitoring systems, are considered. A variant and algorithm for the implementation of a multichannel synchronous information-measuring warning system has been proposed.

Keywords. Information-measuring systems, synchronization, synchronous data processing, quantizer.

УДК 621.396

Назаров А.М, Абдукадиров А.Х, Ликонцев А.Н, Мадаминов Х.Х.

РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В статье рассмотрены различные модели для расчета распространение радиоволн электромагнитного поля внутри помещений сложной формы с целью определения в них электромагнитной обстановки.

Ключевые слова: внутри помещения, свободном пространства, межэтажными перекрытиями, модель расчета радиопокрытия.

Электромагнитная обстановка внутри помещений определяется, в основном, потерями внутри стен и в окружающей мебели

Выражения для моделирования распространения радиоволн в помещениях можно разделить на следующие четыре группы.

Статистические модели. Эти модели не требуют никакой информации о стенах в здании. Необходимо только описание типа зданий (офис, гостиница, магазин и т.д.) [1-6].

Эмпирические модели с прямым путем распространения (однолучевые). Они основаны на прямом пути между передатчиком и приемником, никакие другие лучи не рассматриваются [1-5].

Эмпирические многолучевые модели. Этот новый подход основан на многолучевом распространении волн между передатчиком и приемником. Рассчитываются различные виды путей, и их параметры используются для прогнозирования уровней поля [4].

Модели на основе геометрической оптики. Распространение радиоволн в УКВ диапазоне может быть описано с помощью квазиоптических моделей распространения, рассматривающими отражение на стенах и дифракцию на углах. Созданы различные подходы, такие

как трассировка луча (слежение за лучом) и пуск луча. Каждая группа содержит разные реализации подхода, но все модели, относящиеся к одной группе, приводят к примерно схожим результатам и имеют одинаковые преимущества и недостатки.

Рассмотрим эти модели более подробно.

Эмпирические однолучевые модели. В помещениях ослабление поля обусловленное расстоянием уже не такое, как в свободном пространстве, из-за отражения, дифракции и рассеивания, даже если между антеннами передатчика и приемника есть прямая видимость. В принципе, предложенные к настоящему времени эмпирические однолучевые модели распространения сигналов внутри помещений можно разделить на 2 группы в зависимости от взаимного расположения антенн приемника и передатчика - одноэтажные модели и многоэтажные модели [7-8]. Вычисление величины потерь на пути распространения производится путем сравнения выходной мощности в точке антенны передатчика и уровня сигнала на входе приемника и включает все потери между этими точками из-за антенн, фидеров, потерь в свободном пространстве и другие [7-8].

Потери в свободном пространстве, можно рассчитать по формуле

$$L = 32,44 + 20lgd + 20lgf, \text{ dB}, \quad (1)$$

где d - расстояние между антеннами в км, а f - несущая частота в МГц.

Модель COST231 для помещений. Модель потерь на трассе внутри помещения, выраженная в дБ, представляет собой следующую форму, которая получена из модели COST 231 для среды внутри помещения [9]

$$L = 37 + 20lgd + \sum N_{ct,i} L_{ct,i} + 18,3q^{[(q+2)/(q+1)-0,46]} \text{ dB}, \quad (2)$$

где d - расстояние между антеннами приемника и передатчика, выраженное в метрах; $N_{ct,i}$ - количество пересекаемых стен типа i ; $L_{ct,i}$ - потери на i стене; q - количество, пересекаемых волной, межэтажных перекрытий.

Обычно рассматриваются два типа стен внутри здания - легкие внутренние стены с фактором потерь в 3,4 дБ и стандартные внутренние стены с фактором потерь в 6,9 дБ.

Если не моделировать внутренние стены индивидуально, внутренняя модель потерь представляет следующее выражение

$$L = 37 + 30lgd + 18,3q^{[(q+2)/(q+1)-0,46]} \text{ dB}. \quad (3)$$

Потери в свободном пространстве (в зоне прямой видимости):

$$L = 30,18 + 26lgd, \text{ dB}. \quad (4)$$

Общая величина потерь на препятствиях

$$L = 34,53 + 38lgd, \text{ dB}. \quad (5)$$

Одноэтажные модели. Эти модели используются, когда антенны передатчика и приемника расположены на одном этаже внутри здания [9-10]. Модель потерь на линии радиосвязи в зависимости от расстояния, также известная как d_n модель или статистическая модель «One slope» или «Один наклон», основана на формуле для вычисления величины потерь в дБ на беспроводной линии связи

$$L_{0,1мД} = L(r_0) + 10n \lg(r/r_0), \text{ dB}, \quad (6)$$

где $L_{ном}$ - потери на линии радиосвязи в помещении, r_0 - исходное расстояние, обычно 1 м, $L_{0,1мД}$ - соответствующая величина потерь в свободном пространстве, а n - показатель степенной зависимости от расстояния.

Статистическая модель Dual slope [10] учитывает отличия потери мощности сигнала на дальних и ближних расстояниях. В ней появилось разделение расстояния между приемником и передатчиком на 2 зоны точкой разрыва $d_{пер}$ - ближнюю и дальнюю:

$$L_1(r) = 10 M_{пер,i} \lg(r/d_n) + L_{BR}, r < d_{пер} \text{ dB}, \quad (7)$$

$$L_2(r) = 10 M_{пер,i} \lg(r/d_n) + L_{BR}, r \geq d_{пер} \text{ dB}, \quad (8)$$

где $M_{пер,i}$ - коэффициенты уменьшения мощности на промежутке до и после d_{BR} . Как правило принимают равными 2 и 6 соответственно.

Сравнивая формулы (1) и (6), можно видеть, что $M_{пер,i}$ равно 2 внутри помещений. Для помещений величина $M_{пер,i}$ зависит от несущей частоты, от типа и планировки здания. В литературе можно найти значения $M_{пер,i}$ до 6,5 для сильно загроможденных путей распространения радиоволн. Такая модель может применяться в одном из вариантов программного продукта и характеризуется быстротой расчетов, при выполнении которых требуется определить только расстояние между антеннами - все другие параметры и константы относятся ко всему зданию в целом и задаются предварительно [7-10]. Параметр $M_{пер}$ очень чувствителен к среде распространения, т.е. к типу строительных материалов, типу интерьера, местоположению зданию и т.д. Ко всему прочему, значение n может варьироваться от 1,2 (волноводный эффект) до 6 и может зависеть от способа получения и

обработки данных. Оценка потерь мощности при использовании подобных моделей осуществляется очень быстро, дает приемлемую ошибку, но не учитывает таких особенностей, как геометрия помещений, высота расположения антенн и т.д. Для анализа затухания сигнала в многоэтажных зданиях обычно - вводят поправочные коэффициенты. Типичные значения составляют: 15 дБ для первого этажа; 6-10 дБ на каждый этаж от второго до пятого; 1-2 дБ на этаж выше пятого этажа. Модель потерь, основанная на ослабляющем факторе перегородки, учитывает потери на перегородках для оценки внутренних потерь на линии радиосвязи. На распространение сигнала внутри здания влияют строительные материалы стен, и другие перегородки внутри здания [8-10]. Так, эта модель в сравнении с d_n моделью вводит дополнительные потери из-за влияния стен и перегородок. Формула для потерь в помещениях в этой модели имеет вид

$$L_{п} = L_{0,1мД} + 10n \lg(r/r_0) + \sum P_k AF_k, \text{ dB}. \quad (9)$$

Когда радиосигнал проходит через P_k перегородок или стен класса k , каждая из них добавляет ослабление, выражаемое в AF_k факторе. Их сумма представляет полную величину потерь на трассе, вызываемую всеми перегородками на данном этаже, преграждающими путь волны (таблицы 1, 2). Модель *Motley-Keenan* [11] учитывает в расчетах все стены, пересекаемые прямым лучом между антеннами передатчика и приемника, и полагает что только количество стен влияет на общую величину потерь. Различные типы зданий (офисные здания, новые или старые здания, библиотеки, гостиницы и т.д.) характеризуются разными величинами потерь на стенах.

Если известен материал стен, то можно вычислить среднюю величину потерь на стенах внутри здания. Модели этой группы основаны на добавлении к статистической модели потерь во всех стенках на пути между приемной и передающей антеннами. Так, в модели *DPM (Dominant Path Model)* [15], к основному лучу добавляются дополнительные лучи, проходящие через помещения, соседние к помещениям, лежащим на главном пути. При этом точный поиск точек отражения радиоволны не производится.

Многоэтажные модели. Эти модели применимы, когда антенны передатчика и приемника располагаются на разных этажах. Модель потерь на линии связи в зависимости от расстояния также выражается уравнением (6), но рассматриваются большие значения n . В случаях вплоть до трех перекрытий значение n обычно находится между 4 и 5,5 [16-20, 40].

Модель потерь, основанная на ослабляющем факторе межэтажных перекрытий, записывается уравнением (7) с добавлением потерь, вызванных межэтажными перекрытиями, обозначенными как $L_{МЭП}$

$$L_{м} = L_{0,1мД} + 10n \lg(r/r_0) + L_{МЭП}, \text{ dB}. \quad (10)$$

В многоэтажном здании необходимо одновременно учитывать перегородки и многоэтажные потери. Полная формула внутри помещений, имеет вид [12-19]

$$L_{п} = L_{0,1мД} + 10n \lg(r/r_0) + \sum P_k AF_k + L_{МЭП}, \text{ dB}. \quad (11)$$

Типичные значения $L_{МЭП}$ составляют около 15 дБ для одного этажа и еще 5-12 дБ на каждый дополнительный этаж, вплоть до пяти этажей. При рассмотрении более пяти этажей не наблюдается существенного увеличения $L_{МЭП}$ [40].

Однолучевые модели *Motley-Keenan* и *COST231Multi-wall* представляют собой усовершенствованную модель «One slope»

$$L(d) = L_M + 10n \lg d + N_{ct} L_{ct,i} \text{ dB}, \quad (12)$$

$$L = L_{0,1мД} + 10n \lg d + \sum N_{ct} L_{ct,i} + L_{F} m_{пер}^{\{(n+2)/(n+1)-b_{ЭМП}\}}, \text{ dB}, \quad (13)$$

где $L_{0,1мД}$ - потери в свободном пространстве на расстоянии $d_0 = 1$ м; L_M - измеренные потери мощности

сигнала на расстоянии 1 м ; $N_{\text{ст}}$ – количество пройденных препятствий (стен) типа i ;

$L_{\text{ст},i}$ – потеря мощности сигнала при прохождении через препятствие (стену) типа i ; $L_{\text{пер}}$ – потеря мощности сигнала при прохождении через пол; $m_{\text{пер}}$ – количество пройденных сигналом полов; $b_{\text{эм,п}}$ – эмпирический параметр.

Основная модель потерь, рекомендованная МСЭ, имеет следующий вид [41]

$$L_{\text{total}} = 20 \lg f + N \lg d + L_{\text{пер}}(m_{\text{пер}}) - 28, \text{ dB}, \quad (14)$$

где N – дистанционный коэффициент потерь

мощности; f – частота в МГц; r – расстояние разнесения в метрах между базовой станцией и переносным терминалом (где $d > 1 \text{ м}$); $L_{\text{пер}}$ – коэффициент потерь за счет прохождения сигнала через пол в dB; $m_{\text{пер}}$ – количество этажей между базовой станцией и переносным терминалом ($n \geq 1$).

Для различных частотных диапазонов, для которых коэффициент потери мощности в жилых помещениях не установлен, можно использовать соответствующее значение этого коэффициента для служебных помещений.

Таблица 1

Зависимость показателей степени затухания от типа помещения

Помещение	Частота, МГц	Показатель степени n	Отклонение, dB
Магазин	914	2,2	8,7
Лавка	914	1,8	5,2
Офис, много перегородок	1500	3,0	7,0
Офис, мало перегородок	900	2,4	9,6
Офис, мало перегородок	1900	2,6	14,1
Производство (текстиль/химия)	1300	2,0	3,0
Производство (текстиль/химия)	4000	2,1	7,0
Производство (бумага/крупа)	1300	1,8	6,0
Производство (металлургия)	1300	1,6	5,8
Частный дом (изнутри на улицу)	900	3,0	7,0

Таблица 2

Конфигурация помещений	Степенной показатель затухания
Коридоры	1,4...1,9
Большие открытые комнаты	2
Меблированные комнаты	3
Плотно заставленные комнаты	4
Между разными этажами	5

Следует отметить, что могут существовать ограничения на изоляцию, предполагаемую при прохождении сигналов между этажами. Сигнал может найти другие, внешние пути для завершения линии связи с меньшими общими потерями, чем при многократном пересечении перекрытий между этажами.

Если эти внешние пути исключить, то измерения на частоте 5,2 GHz показали, что при нормальном падении радиоволн средние дополнительные потери при прохождении типовых междуэтажных железобетонных перекрытий с подвесными потолками составляют 20 dB

при стандартном отклонении 1,5 dB. Осветительные приборы увеличивают средние потери до 30 dB при стандартном отклонении 3 dB, а вентиляционные каналы под полом увеличивают средние потери до 36 dB при стандартном отклонении 5 dB. Эти значения должны использоваться вместо коэффициентов $L_{\text{пер}}$ в моделях, зависящих от места, таких как связанных с построением лучей.

Характерные параметры, основанные на результатах различных измерений, приведены в табл.3 и 4.

Таблица 3

Коэффициенты потери мощности N , используемые при расчете потерь передачи внутри помещения

Частота в GHz	Жилые дома	Офисы	Промышленные здания
0,9	-	33	20
1,2-1,3	-	32	22
1,8-2,0	28	30	22
4,0	-	28	22
5,2	-	31	-
60,0 ¹	-	22	17
70,0 ¹	-	22	-

¹Подразумевается, что на частоте 60 GHz происходит распространение в пределах одной комнаты или помещения, при этом поправки на передачу при прохождении сигнала через стены не учитываются.

Таблица 4

Коэффициенты потерь при прохождении сигнала через пол $L_{\text{пер}}$ в dB, где $m_{\text{пер}}$ – число пройденных этажей, используемые при расчете потерь передачи внутри помещения ($n \geq 1$)

Частота в GHz	Жилые дома	Офисы	Промышленные здания
0,9	—	9 (1 этаж) 19 (2 этажа) 24 (3 этажа)	—
1,8-2,0	$4n$	$15 + 4(m_{\text{пер}} - 1)$	$6 + 3(m_{\text{пер}} - 1)$
5,2	—	16 (1 этаж)	—

Некоторые общие заключения можно прибли-

зительно вывести для диапазона 900...2000 МГц:

- на трассах с компонентой прямой видимости (L_{op}) доминируют потери передачи в свободном пространстве, а дистанционный коэффициент потери мощности для них равняется примерно 20;

- для больших открытых помещений также характерно значение дистанционного коэффициента потери мощности порядка 20; это может объясняться наличием мощной составляющей L_{op} в большинстве зон помещения. Примерами могут служить помещения, расположенные в больших торговых складах, спортивные арены, заводские помещения и офисы открытой планировки;

- в коридорах отмечаются меньшие потери на трассе, чем в свободном пространстве, с типичным дистанционным коэффициентом потери мощности порядка 18. Гастрономы с их длинными, линейными проходами между стеллажами имеют характеристики потерь, соответствующие коридорам;

- распространение огибанием препятствий и через стены ведет к значительным дополнительным потерям, которые в обычных условиях могут увеличить дистанционный коэффициент потерь мощности до 40. Примерами могут служить трассы между комнатами в офисных помещениях закрытой планировки;

- на длинных трассах без препятствий в первой зоне Френеля может возникнуть "точка излома кривой". На этом расстоянии дистанционный коэффициент потери мощности может меняться примерно от 20 до 40;

- уменьшение коэффициента потерь на трассе при увеличении частоты для условий приема в офисах (табл.3) не всегда наблюдается или легко объяснимо. С одной стороны, при увеличении частоты потери при прохождении сквозь препятствия (например, стены, мебель) возрастают, и дифрагированные сигналы дают меньший вклад в мощность принимаемого сигнала; с другой стороны зона Френеля менее закрыта на более высоких частотах, что приводит к меньшим потерям. Фактические потери на трассе зависят от этих противоположно действующих механизмов.

Эмпирические многолучевые модели. Статистические модели являются результатом обобщения большого числа измерений, причем таким образом, чтобы распространения и быстрое затухание также возможны с моделью доминантного луча [15]. Эта модель очень мало зависит от точности базы данных, потому что не рассматривает точного расположения стен, и только информация о комнате и соседних комнатах влияет на расчет лучей [7-10, 14-22].

Вычисление выполняется в две стадии; сначала рассчитываются основные лучи к каждой комнате, а потом, если антенны передатчика и приемника находятся в одной и той же комнате, рассчитываются основные лучи в каждой комнате. Это второе вычисление принимает во внимание выпуклые углы в комнате. В этом случае, выпуклые углы учитываются, когда нет прямой видимости между антеннами передатчика и приемника. Тогда дерево строится так, как дерево для структуры комнаты [20-26].

Модели на основе геометрической оптики. В то время как статистические модели весьма полезны в качестве руководства при планировании, детерминированные (или учитывающие особенности места) модели особенно ценны для тех, кто занимается проектированием систем.

При разработке эмпирических моделей часто не учитывают геометрические характеристики среды. Этот недостаток проявляется при многолучевом распространении радиоволн в помещениях. Трассировка

их можно было использовать для имитации передач сигналов. Например, можно осуществить имитацию с помощью модели дискретного, в широком смысле стационарного канала с некоррелированным рассеянием ($WSSUS$). Один из способов такой имитации состоит в замене многочисленных трасс рассеяния, которые могут существовать в реальном канале, лишь несколькими N многолучевыми компонентами в модели. Затем с помощью сложных, меняющихся во времени Гауссовых процессов $g_n(t)$ моделируется суперпозиция неразрешенных многолучевых составляющих, приходящих под разными углами и с временными задержками, близкими по величине к задержке $\tau_{div,N}$ $N_{луч}$ многолучевой составляющей модели. Такая статистическая модель требует соответствующих параметров для каждой составляющей.

Многолучевое распространение весьма важно учитывать в помещениях и многолучевая модель должна рассматривать многолучевые параметры для получения более точных результатов. В связи с этим была разработана модель доминантного луча (*Dominant Path Model*) [15]. Она учитывает преобладающие пути (доминантные лучи) между антеннами передатчика и приемника, рассматривая многолучевое распространение и снижая время вычисления почти до уровня эмпирических однолучевых моделей.

После расчета комнат (базе данных необходимо только векторно-ориентированное описание стен здания) для каждой комнаты вычисляются соседние комнаты и отношения соседства между комнатами и сохраняются в базе данных, потому что они не зависят от положения антенн передатчика и могут быть использованы во всех прогнозах.

Основываясь на соотношениях расположения комнат, рассчитывается дерево комнатной структуры, изображающее схему и расстановку комнат [15-17]. Лучи от антенны передатчика к антенне приемника и комнаты, пройденные этими лучами, определяются по дереву комнат и потому не относятся к специфическим стенам. Дальнейшая информация о дереве комнат и нахождении лучей представлена в [18-20].

Весьма точное предсказание задержки лучей это способ симуляции канала связи, учитывающий геометрические размеры помещений, т.е. распространение радиоволн представляется как распространение большого количества самостоятельных лучей, которые имеют характеристики как ослабления, так и отражения от стен помещений. При передаче сигнала в здании с известными размерами помещений модель трассировки лучей имеет вид $\beta_i^d = |\beta_i^d| \cdot \exp(j\phi_i^d)$ - амплитуда и τ_i^d - задержка при распространении i -того пути, угол падения и отражения луча, количество отражений и фаза сигнала. При симуляции набор лучей, посылаемый от передающей антенны к приемной, трассируется до тех пор, пока лучи либо достигнут приемной антенны, либо исчезнут за счет ослабления в среде.

Можно выделить несколько методов разработки детерминированных моделей распределения. Модели геометрической оптики - наиболее общий подход к вычислению напряженности поля внутри зданий. Они рассчитывают все существенные лучи между передатчиком и приемником, которые, однако, приводят к длительному времени вычисления. Были предложены различные подходы, сокращающие время вычисления до приемлемых значений [27-32].

Напряженность поля вдоль одиночного луча вычисляется с помощью геометрической/однородной теории

дифракции. Кроме того, с помощью этих моделей также возможно предсказание напряженности поля, предсказание задержки распространения.

Одним из главных недостатков моделей на основе геометрической оптики является их сильная зависимость от точности базы данных. Если материал стены точно не определен или если расположение стен варьируется относительно действительного расположения, предсказание ведет к различным и неправильным результатам.

В СВЧ диапазоне распространение можно изучать с помощью квазиоптических моделей, учитывающих отражения от стен и дифракцию на углах. Различают два основных подхода: прокладка лучей (ray tracing) и запуск лучей (ray launching) [33-37]. Каждый из них имеет свои преимущества и недостатки.

Модели прокладки и запуска лучей. При прокладке лучей рассчитываются все лучи, достигающие приемника (для каждого приемника отдельно) с обязательным перебором всех отражающих поверхностей (стен). Такой подход требует значительно большего времени расчета, поскольку при запуске лучей лучи «излучаются» (прокладываются) передатчиком с постоянным приращением угла. Проблемы же в данном варианте возникают при «размножении» лучей из-за большого числа отражений, особенно на длинных дистанциях.

Алгоритм запуска лучей вычисляет все возможные пути распространения сигнала от передатчика к приемнику. В основных моделях трассировки луча предсказание основано на вычислении пространственного распространения и отражения от стен. Более сложные алгоритмы включают механизмы дифракции, рассеивания, прохождения через различные материалы. Наконец, уровень сигнала в любом конкретном месте находится как сумма компонентов, достигших данной точки. Помимо потерь при распространении, модели трассировки луча могут предсказать временную дисперсию.

Трассировочные модели относятся к группе наиболее точных моделей в предсказании уровня электромагнитного поля. Тем не менее, они требуют очень детального анализа территории. Их точность зависит от точности и полноты данных о плане местности. К тому же осуществление вычисления таких моделей требует больших вычислительных ресурсов. Время вычисления экспоненциально зависит от подробности плана территории. Поэтому время расчета для маленькой территории с большим количеством деталей может быть больше, чем для большой территории с малой детализацией.

Г-образная модель. В работе [37] предложена геометрическая (трассировки лучей) модель распространения радиоволн в помещениях Г-образной конфигурации (коридор с поворотом). Модель используется для предсказания мощности принимаемого сигнала, в точке приема. В модели учитывается до четырех отражений от стен (считается, что из-за потерь отражения учет слагаемых более высокой степени не привносит существенных изменений в точность модели). Модель строится на основе экспериментальных данных в диапазонах частот 433, 915 и 2400 МГц в помещении.

Для применений внутри помещений были изучены, в частности, метод конечных разностей во временной области (*FDTD*), и метод, основанный на геометрической оптике. Метод геометрической оптики более эффективен в отношении вычислений, чем *FDTD*. В методе, основанном на геометрической оптике, существуют два основных подхода: использование изображений и

возбуждение луча. В методе изображений используются изображения приемника по отношению ко всем отражающим поверхностям окружающей среды. Рассчитываются координаты всех изображений, а затем определяются траектории лучей по направлению к этим изображениям. Подход с возбуждением луча предполагает равномерное распределение ряда возбужденных лучей в пространстве вокруг передающей антенны. Траектория каждого луча прослеживается до тех пор, пока он не достигнет приемника, или его амплитуда не упадет ниже заданного уровня. Сравнение подхода с возбуждением луча и подхода с использованием изображений показывает, что первый метод более гибкий, поскольку дифрагированные и рассеянные лучи можно рассматривать вместе с зеркально отраженными. Далее, используя метод расщепления луча или вариационный метод, можно сократить время расчетов, сохранив при этом требуемое разрешение. Метод возбуждения луча подходит для прогнозирования импульсной характеристики канала, обслуживающего обширную зону, тогда как метод изображений хорош для прогнозов в случае связи пункта с пунктом. Детерминированные модели, как правило, основаны на ряде предположений о влиянии строительных материалов здания на характеристики распространения на рассматриваемой частоте (см. свойства строительных материалов) Модель, учитывающая особенности места, должна учитывать и геометрию помещения, отражение, дифракцию, и передачу сигнала через стены.

Траектории лучей, отраженных от стен и других поверхностей или проникших сквозь них, рассчитываются с помощью уравнений Френеля. Следовательно, комплексная диэлектрическая проницаемость строительных материалов здания должна быть исходным параметром.

Для расчета дифрагированных лучей можно использовать однородную теорию дифракции (*UTD*). Модели геометрической оптики - наиболее общий подход к вычислению напряженности поля внутри зданий. Они учитывают все существенные лучи между передатчиком и приемником, что, конечно, приводит к длительному времени вычисления. Были предложены различные подходы к ускорению этих моделей, сокращающие время вычисления до приемлемых значений [16-28].

Напряженность поля вдоль одиночного луча вычисляется с помощью геометрической/однородной теории дифракции и с помощью уравнений Френеля для отражения/переноса [26]. Также доступные эмпирические уравнения калибруются с помощью измерений. Кроме того, с помощью этих моделей также возможен расчет распределение уровней напряженности поля и определение времен задержек времени распространения.

Одним из главных недостатков моделей на основе геометрической оптики является их сильная зависимость от описания данных по помещениям [16-28]. Модели этой группы должны максимально полно учитывать информацию о планировке здания. В соответствии с ними определяются все возможные пути попадания сигнала из антенны передатчика в антенну приемника. Для уменьшения связанного с этим времени расчетов предложено несколько способов ускорения вычислительного процесса [20-22].

Имеются две разновидности реализации данного рода моделей, называемые трассировкой лучей (ray tracing) и образованием (запуском) лучей (ray launching). Число учитываемых итераций (отражений, препятствий) зависит от мощности компьютера. Большинство моделей ограничено максимум шестью итерациями, включая не более двух

препятствий.

Существует метод, который отслеживает пути распространения луча от точки создания (антенны), до точки, в которой производится измерение. Этот метод известен как метод трассировки лучей и стал применяться для моделей распространения радиоволн [8-10]. Эти модели могут дать довольно точный результат расчета, но время расчета весьма велико. В связи с этим был проведен ряд исследований по оптимизации модели трассировки лучей [11]. Там, в частности, рассматривалась конусная трассировка лучей. Все конусы описываются тремя граничными лучами и источником, и каждый конус исследуется, чтобы определить, пересекается он или нет с объектом. Если имеет место частичное пересечение с объектом, конус разделяется на границах объекта. Конусы, которые соединяются точно с одним объектом, используются для генерации дочерних конусов, соответствующих отраженным и переданным сигналам. Когда конусы проходят через сетку интенсивности сигнала, вычисляются фаза и уровень сигнала. Вычисление фазы может быть проблематично, т.к. это затрагивает вычисление многочисленных величин под квадратным корнем. Эта проблема может быть решена с использованием техники билинейной интерполяции, которая менее точна, но более быстрая [18-26]. Разделение решает проблемы, затрагиваемые методом конической трассировки. Поскольку конус имеет только четыре контрольные точки (источник и три границы), стены можно не учитывать, если они слишком малы. Препятствия - другая трудность, когда части конусов соединяются со стенами, закрывающими другие стены. Это решается путем трансформации стен в согласованную систему для обнаружения препятствий [20, 23].

Метод конечных разностей во временной области (FDTD Finite-Difference Time-Domain). Характеристики распространения радиосигналов могут быть получены решением уравнений Максвелла. Метод *FDT*, - метод численного решения этих уравнений. В этом методе уравнения Максвелла представлены в виде системы конечно-разностных уравнений. Метод *FDTD* универсален - он может быть с успехом применен практически во всех задачах электродинамики, требующих численного решения. Это и внутренние задачи, включая анализ структур сложной формы с неоднородностями, волноводных и микрополосковых, и моделирование излучающих структур, антенн, и анализ активных приборов СВЧ, и многое другое. Частотные характеристики исследуемого объекта могут быть получены с помощью дискретного преобразования Фурье или условно, при не очень высокой добротности, путем задания квазигармонического источника и выполнения расчетов до выхода на установившийся режим. Кроме простоты постановки, метод *FDTD* обладает несомненными преимуществами в плане моделирования электродинамических объектов с неоднородными, анизотропными и нелинейными средами с произвольными формами границ. В своей классической постановке метод *FDTD* основан на простой дискретизации уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной пространственно-временной формулировке.

Список литературы:

- [1] Wolfle G. and Landstorfer F. M. Dominant Paths for the Field Strength Prediction. // International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PHMRC), Sept., 1994.- PP. 486-490.
 [2] Carciofi C, Cortina A., Passerini C, and Salviotti S. Fast Field Prediction Techniques for Indoor Communication Systems.// 2nd European Personal and Mobile

Communications Conference (EPMCC), Bonn, November, 1997.- PP. 37 – 42.

[3] Degli E. V., Carciofi C, FruUone M., and Riva G., "Sensitivity of Ray-Tracing Indoor Field Strength Prediction to Environment Modelling," in European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research (COST), COST 259 TD(97)049, (Lisbon), Sept. 1997.

[4] Landron O., Feuerstein M. J. and Rappaport T. S. A Comparison of Theoretical and Empirical Reflection Coefficients for Typical Exterior Wall Surfaces in a Mobile Radio Environment.// IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, Mar., 1996.- PP. 341-351.

[5] Gibson T. B. and Jenn D. C. Prediction and Measurement of Wall Insertion Loss.// IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 47, , Jan. 1999.- PP. 55-57.

[6] Danielle P., Degli E. V., Falciasecca G. J. R. G., Fru Uone M. Evaluation of the Reliability of a Ray Tracing Microcellular Field Prediction Model // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS), (Innsbruck, Austria), July 1996.- P.513.

[7] Qiang G. Status of 802.20 channel models, IEE 802.20 WG session #6, January 12-15, 2004.

[8] John C. S. Indoor radio WLAN performance Part II: Range Performance in a dense office environment, May - 2000.

[9] Lahtenmaki J. Indoor Propagation Models // COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems: Final report. 1999. P.175-179.

[10] Saunders S.R. Antennas and propagation for wireless communication systems. England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.

[11] Motley A., Keenan J. Indoor Propagation Models // COST Action 231: Digital mobile radio towards future generation systems: Final report. 1999. PR. 175-179.

[12] Willam C.Y. Lee. Mobile Cellular Telecommunications. Analog and Digital Systems, Second Edition. - International Editions, 1995.

[13] Ponomarev G.A., Kulikov A.H., Telpuxovskiy E. D. Rasprostranenie UKV v gorode. - Tomsk: MP «Rasko», 1991.

[14] Svyaz s podvijnymi ob'ektami v diapazone SVCH / Pod red. U.K. Djeyksa. -M.: Svyaz, 1979.

[15] Wolfle G., Landstorfer F. M., Gahleitner R., and Bonek E. Extensions to the Field Strength Prediction Technique based on Dominant Paths between Transmitter and Receiver in Indoor Wireless Communications // 2nd European Personal and Mobile Communications Conference (EPMCC), (Bonn), Nov., 1997.- PP. 29 - 36.

[16] Patwari N., Wang Y., and O'Dea R. J., "The importance of the multipoint-to-multipoint indoor radio channel in ad hoc networks," in IEEE Wireless Commun. Networking Conf., Mar. 2002, PP. 608–612.

[17] Heddergott R., Bernhard U. P., Fleury B. H. Stochastic radio channel model for advanced indoor mobile communication systems.// Proc. IEEE 8th Int. Symp. on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, vol.1, Sep., 1997, PP. 140–144.

[18] Saleh AAM, Valenzuela RA., "A statistical model for indoor multipath propagation," IEEE Journal on Selected Areas in Communication , Vol. 5, 1987.- PP.128–137.

[19] Ho-Shin Cho, Jae Kyun Kwon, and Dan Keun Sung, "High Reuse Efficiency of Radio Resources in Urban Cellular Systems," IEEE Trans. on VT, Vol. 49, No. 5, , Sep., 2000.- PP. 1669-1677.

[20] R. Heddergott, U. P. Bernhard, and B. Fleury, "Stochastic radio channel model for advanced indoor mobile communication systems// Proc. of the 8th IEEE Int. Symp. on

Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '97), (Helsinki, Finland), Sept. 1997.

[21] Steven J. H. and Kaveh P. Autoregressive Modeling of Wide-Band Indoor Radio Propagation, *IEEE Transaction on Communications*, vol 40, No.9, September, 1992.

[22] Homayon H. Impulse Response Modeling of Indoor Radio Propagation Channels, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, vol. 11, No.7, September, 1993.

[23] Hirofumi S. A Statistical Model for Urban Radio Propagation, *IEEE Transactions on Communications*, vol. com-25, No. 7, July, 1977.

[24] Laura D., Guido T. and Fiorenzo T. Statistical Analysis of Measured Impulse Response Functions of 2.0 GHz Indoor Radio Channels, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 14, No. 3, April, 1996.

[25] Adel A. M. S. and Reinaldo A. V. A statistical Model for Indoor Multipath Propagation, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. sac-5, No.2, February, 1987.

[26] Robert J.C. V. and Keith G. B. Propagation Characteristics on Microcellular Urban Mobile Radio Channels at 910 MHz, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.7, No.1, January, 1989.

[27] Carciofi G, Cortina A., Passerini C, and Salvietti S., Fast Field Prediction Techniques for Indoor Communication Systems.// 2nd European Personal and Mobile Communications Conference (EPMCC), (Bonn), Nov. 1997.- PP.37-42,

[28] Seidel Si Y. and Rappaport T. S. A Ray Tracing Technique to Predict Path loss and Delay Spread Inside Buildings.//*Proc. IEEE GlobeCom*,1992.- PP.649-653.

[29] Pahlavan K., et all, *Wideband* radio propagation modeling for indoor geolocation applications.// *IEEE Communications Magazine*, April, 1998.- PP.60-65.

[30] Patwari N., et all. The Importance of the Multipoint-to-Multipoint Indoor Radio Channel in Ad Hoc Networks.//*Proc. IEEE WCNC* 2002.

[31] Hills A., et all. Estimating Signal Strengths in the Design of an Indoor Wireless Network. //*IEEE Trans. Wireless Comm.* vol. 3, January 2004.- PP.17-19.

[32] Kivinen Jt., et all. Empirical Characterization of Wideband Indoor Radio Channel at 5.3 GHz. //*IEEE Trans. Ant. and Prop.*, vol. 49, August, 2001.-PP.1192-1203.

[33] Zhang Z., Yun Z. and Iskander M.F. Ray Tracing Method for Propagation.

Models in Wireless Communication Systems. //*Electron. Lett.*, vol.36, No.5, Mar. 2000.- PP.464-465.

[34] Hassan-Ali M. and Pahlavan K. A New Statistical Model for Site-specific Indoor Radio Propagation Prediction Based on Geometric Optics and Geometric Probability.//*IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.1, Jan., 2002.- PP.112-124.

[35] Wolfle G. Propagation Models for Indoor Radio Network Planning including Tunnels.//*AP2000*, Davos, Switzerland, April, 2000.

[36] Motley A.J. and Keenan J.M. Radio Coverage in Buildings.//*Bell System Technical Journal (BSTJ)*, vol.8, Jan.,1990.-PP.19-24.

[37] Aung M.E., CHjo N. L., Kondratov A.V., Lujnov M.S. Geometricheskaya model rasprostraneniya radiovoln v pomesheniyaх G-obraznoy konfiguratsii.// *Vserossiyskaya mezhvuzovskaya nauchno-texnicheskaya konferentsiya studentov i aspirantov «Mikroelektronika i informatika»*. Tezisy dokladov. M.:MIET, 2008.- S.223.

[38] John S. T., Perter M. G., and Eernard M. Smart

Antenna Arrays for CDMA systems, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 22, No. 8, April, 1998.

[39] Robert J.C. V.. Measurement Characterization and Modeling of Indoor 800/900MHz Radio Channels for Digital Communications, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 25, No. 6, June, 1987.

[40] Aung Mint Ey, Pronin A.A. i Kondratov A.V. Eksperimentalnoe issledovanie zatuxaniya radiovoln vnutri pomesheniya na chastote 433 MGs.// *Izvestiya VUZov, Elektronika*, №5, 2007. – С.86-88.

[41] Rekomendatsiya MSE-R P.1238-7 Dannye o rasprostraneniі radiovolni i metod prognozirovaniya dlya planirovaniya sistem radiosvyazi vnutri pomesheniya i lokalnix zonovыkh radiosetey v chastotnom diapazone 900 MGs –100 GGs.

Сведения об авторах:

Назаров Абдулазиз Мунинович

д.т.н., Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова, Кафедра «Радиотехнический устройства и систем», Профессор

Сотовый телефон: +998 90 999 20 29

e-mail: Nazarov57@mail.ru

Абдукадыров Алишер Хабибуллаевич

к.т.н., Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий, Кафедра «Технологии мобильной связи», Доцент.

Сотовый телефон: +998 90 998 38 40

e-mail: alimot@mail.ru

Ликонцев Алексей Николаевич

к.т.н., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций.

Кафедра радиосистем и обработки сигналов.

Доцент.

Сотовый телефон: +79119218191.

e-mail: Likontsev-rts@mail.ru .

Мадаминов Хайдар Худаярович

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий,

Кафедра «Технологии мобильной связи»,

старший преподаватель.

Сотовый телефон: +998 94 6855151

e-mail: h.madaminov1978@gmail.com

A.M. Nazarov, A.Kh. Abdukadirov, A.N. Likontsev, H.H. Madaminov

Calculation of the propagation of radio waves of an electromagnetic field inside a complex shape

The article considers various models for calculating the propagation of radio waves of an electromagnetic field inside a complex shape to determine the electromagnetic environment in them.

Keywords: indoor, free space, interstorey floors, the model of calculating the radio coverage