

УДК 621.391.812.7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ПОМЕЩЕНИИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ ПРЕДМЕТОВ

А. Н. Якимов <sup>1</sup>, П. Г. Андреев <sup>2</sup>, В. В. Князева <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроения

<sup>2</sup> Пензенский государственный университет

Статья получена 18 февраля 2015 г.

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы построения математической модели распространения электромагнитных волн СВЧ диапазона в помещении прямоугольной формы с учетом влияния местных предметов. Проведено сравнение результатов математического моделирования и экспериментального исследования.

**Ключевые слова:** математическая модель, электромагнитные волны в помещении, отражение.

**Abstract:** Considered the issues of building a mathematical model of the propagation of electromagnetic waves in the microwave range in the room of a squared shape with the influence of local subjects. The comparison of the results of mathematical modeling and experimental studies is carried out.

**Key words:** mathematical model, electromagnetic waves indoors, reflection.

Быстрое развитие беспроводных систем связи и других радиотехнических средств, использующих беспроводную связь внутри помещений, актуализировало проблему учета влияния условий распространения радиоволн на работу подобных устройств. На сегодняшний день существует множество математических моделей, позволяющих рассчитать усредненное значение принимаемой мощности СВЧ сигнала в условиях города. Большинство из них являются либо частично, либо полностью эмпирическими и основываются на определении затухания электромагнитных волн СВЧ диапазона с точностью до 7...20 дБ [1, 2,

3]. Применение таких математических моделей для нахождения параметров электромагнитных волн внутри помещений затруднено из-за явного проявления эффектов поглощения, отражения, рассеяния, интерференции и дифракции, а также ограничений, связанных с применением соответствующих информационных технологий [4, 5, 6]. Поэтому исследование распространения электромагнитных волн в помещении прямоугольной формы с учетом влияния местных предметов путем математического моделирования соответствующих процессов является актуальной задачей.

Согласно рекомендациям Международного союза электросвязи математическая модель распространения электромагнитных волн в помещениях должна учитывать множество дополнительных факторов: потери в процессе распространения и отражений от стен и потолков, дифракцию на препятствиях, несовпадение поляризации электромагнитных волн, перемещение абонента, распределение задержек сигнала, размещение передающих (приемных) антенн. К перечисленным факторам можно добавить эффект затенения, обусловленный наличием в помещении мебели, а также людей, постоянно меняющих свое местоположение в пространстве. Таким образом, в большинстве случаев характерно многолучевое распространение сигнала, когда сигнал передатчика достигает приемника несколькими различными путями, в результате в точке приема возможно несколько копий сигнала с примерно равными амплитудами.

Существуют следующие наиболее существенные эффекты, к которым приводит многолучевое распространение сигнала:

- из-за доплеровского сдвига для различных копий сигнала возникает случайная угловая модуляция несущей;
- вследствие различного времени распространения копий сигнал от передатчика к точке приема возможен эффект эха, т.е. временная дисперсия;
- достаточно быстрые изменения напряженности электромагнитного поля на сравнительно небольшом расстоянии или в течение короткого времени, так называемый – фединг.

Учет перечисленных факторов при решении практических задач проектирования радиотехнических систем различного назначения и оптимального размещения их составных частей внутри помещений прямоугольной формы возможен благодаря применению разработанной математической модели, отражающей интерференционную структуру электромагнитного поля вследствие взаимодействия волн, излученных передатчиком и отраженных от местных предметов. Суммарная величина результирующего сигнала в каждой точке пространства помещения определяется с учетом амплитуд и фаз электромагнитных волн, прошедших путь различной длины от передатчика до рассматриваемой точки пространства за счет однократных отражений от стен, пола, потолка и местных предметов.

Рассмотрим помещение прямоугольной формы, имеющее препятствие на пути распространения электромагнитных волн (см. рис. 1). Здесь источник электромагнитного излучения  $A_1$  совмещен с центром декартовой системы координат. Используя уравнение радиолокации с применением метода геометрической оптики, можно получить выражение, описывающее уровень мощности сигнала на выходе приемной антенны  $A_2$ :

$$P_2 = \frac{P_1 G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 r_0^2} \cdot \left( \left| F_0 + F_n \cdot \rho_n \cdot e^{-j \cdot \alpha_n} + F_g \cdot \rho_g \cdot e^{-j \cdot \alpha_g} + F_n \cdot \rho_n \cdot e^{-j \cdot \alpha_n} + F_l \cdot \rho_l \cdot e^{-j \cdot \alpha_l} \right|^2 \right), \quad (1)$$

где  $P_1$ ,  $P_2$  – уровень мощности на входе  $A_1$  и выходе  $A_2$ , соответственно;  $G_1$ ,  $G_2$  – коэффициенты усиления передающей и приемной антенн;  $r_0$  – расстояние между точкой передачи и приема соответственно;  $\lambda$  – длина волны;  $F_0$ ,  $F_n$ ,  $F_g$ ,  $F_n$ ,  $F_l$  – интерференционные множители, учитывающие направленные свойства источника излучения по направлению на точку приема, пол, потолок, правую и левую стены соответственно, а также попадание на грани местных предметов;  $\alpha_i$ ,  $\alpha_a$ ,  $\alpha_i$ ,  $\alpha_e$  – фазовый множитель компоненты электромагнитного поля при однократном отражении от пола, потолка, правой и левой стен соответственно, а также от граней местных предметов;  $\rho_i$ ,  $\rho_a$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_e$  – модуль

комплексного коэффициента отражения от поверхности пола, потолка, правой и левой стен соответственно, а также от граней местных предметов. При нахождении фазового множителя  $\alpha$  необходимо определять разность фаз  $\beta = \frac{2\pi\delta}{\lambda}$ , обусловленную различием длин путей  $\delta$  «прямой» и «непрямой» волн.

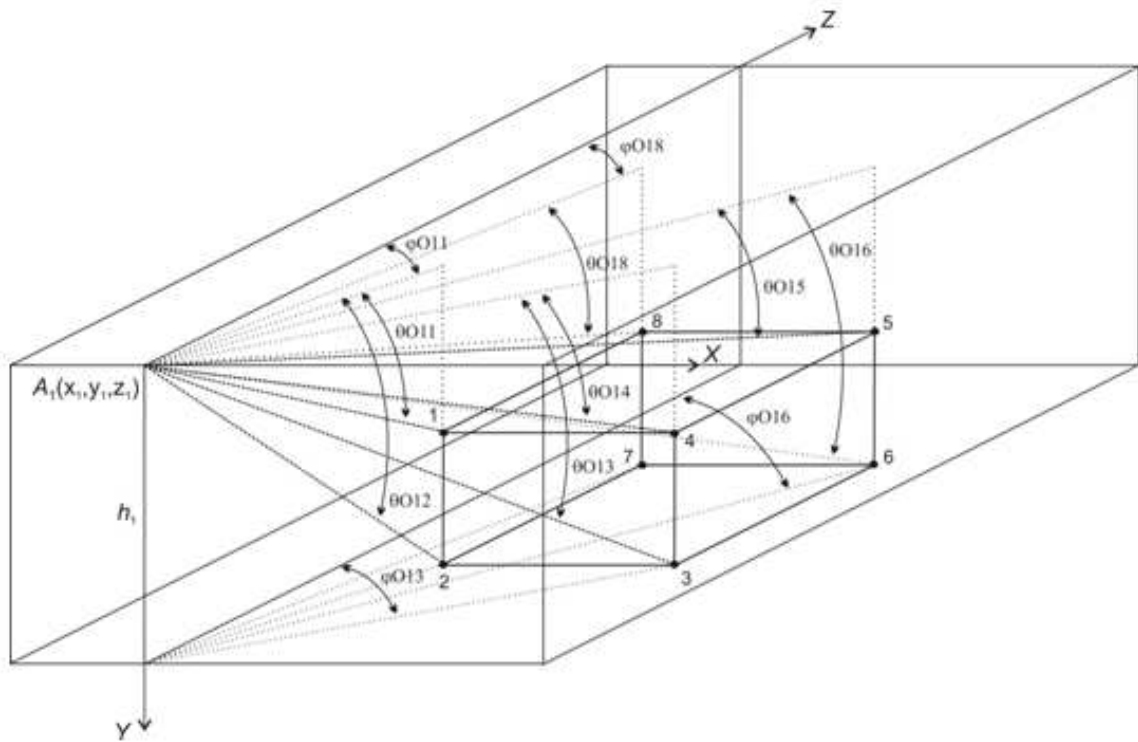


Рис. 1. Представление местных предметов в модели

Общепринятый подход предполагает, что  $\delta = \frac{2h_1h_2}{r_0}$ , где  $h_1, h_2$  – высота подъема над уровнем отражающей поверхности точки передачи и приема соответственно. Причем должно выполняться условие  $r_0 \gg (h_1 + h_2)$ . Следовательно это выражение не применимо для расчетов внутри помещений, где  $r_0$  сопоставимо со значениями  $h_1$  и  $h_2$ . Для расчета  $\delta$  в предложенной математической модели используется следующее выражение:

$$\delta = \left(1 + \frac{h_2}{h_1}\right) \sqrt{(a \cdot \text{tg}(\varphi) - x_1)^2 + (h_2 + y_2 - y_1)^2 + (a)^2} - \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, \quad (2)$$

где  $a = \frac{h_1(z_2 - z_1)}{h_1 + h_2}$  – вспомогательная компонента;  $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$  – координаты точки передачи и приема соответственно.

ординаты точки передачи и приема соответственно.

Описание местных предметов в модели основано на нахождении диапазона углов в направлении из точки излучения на соответствующую грань предмета (см. рис. 1). Введя обозначение каждого угла препятствия согласно рисунку, можно задать координаты его вершин, например, координаты вершины 1 препятствия  $O_1$  равны  $(a_1, b_1, c_1)$ . Тогда угол падения электромагнитной волны в главных плоскостях в направлении на эту вершину из источника излучения равен:

$$\text{для горизонтальной плоскости} - \varphi_1 = \text{arctg}\left(\frac{a_1 - x_1}{c_1 - z_1}\right); \quad (3)$$

$$\text{для вертикальной плоскости} - \theta_1 = \text{arcsin}\left(\frac{b_1 - y_1}{\sqrt{(a_1 - x_1)^2 + (b_1 - y_1)^2 + (c_1 - z_1)^2}}\right). \quad (4)$$

Дальнейший учет местных предметов основан на свойствах электромагнитной волны образовывать область тени, либо отражаться от поверхности предметов. Причем описание, например, передней грани 1\_2\_3\_4 препятствия  $O_1$  по диапазону углов возможно при выполнении следующего условия:

$$(\theta_{O1\min1234} \leq \beta \leq \theta_{O1\max1234}) \wedge (\varphi_{O1\min1234} \leq \gamma \leq \varphi_{O1\max1234}) \wedge (z_2 \geq O_{1c1}), \quad (5)$$

где  $z_2$  – координата вдоль пути распространения волны по оси  $OZ$  точки приема сигнала;  $O_{1c1}$  – координата вершины препятствия;

$\varphi_{O1\min1234} = \min(\varphi_{O1_1}, \varphi_{O1_2}, \varphi_{O1_3}, \varphi_{O1_4})$  – минимальное значение из набора углов

$\varphi$  в горизонтальной плоскости на вершины передней грани;

$\varphi_{O1\max1234} = \max(\varphi_{O1_1}, \varphi_{O1_2}, \varphi_{O1_3}, \varphi_{O1_4})$  – максимальное значение из набора углов

$\varphi$  в горизонтальной плоскости на вершины передней грани;

$\theta_{O1\min1234} = \min(\theta_{O1_1}, \theta_{O1_2}, \theta_{O1_3}, \theta_{O1_4})$  – минимальное значение из набора углов

$\theta$  в вертикальной плоскости на вершины передней грани;

$\theta_{O1\max1234} = \max(\theta_{O1_1}, \theta_{O1_2}, \theta_{O1_3}, \theta_{O1_4})$  – максимальное значение из набора углов

$\theta$  в вертикальной плоскости на вершины передней грани.

Функции «max» и «min» для определения минимального и максимального значения из набора чисел являются стандартными функциями, интегрирован-

ными в математический пакет программ Mathcad. Аналогичное описание выполняется для каждого препятствия в помещении.

Взаимодействие передней грани  $1\_2\_3\_4$  препятствия с каким-либо лучом (компонентой электромагнитного поля) определяется путем подстановки соответствующего угла в вертикальной и горизонтальной плоскостях вместо значений  $\beta$  и  $\gamma$  соответственно.

Таким образом, появляется возможность учета в общем результирующем «сигнале» в точке приема, расположенной в пределах помещения, компонент, отраженных от соответствующих граней препятствия, обладающими своими характерными свойствами. К этим свойствам, при данном подходе, относятся тип материала и проводящие свойства отражающей поверхности. Кроме того, возможен учет как однократного, так и двукратного отражения, отдельно выбранной компоненты от поверхностей объектов, расположенных внутри помещения.

Другим, очевидным плюсом предложенной математической модели является возможность учета характеристик направленности источника излучения, в том числе в зависимости от места его расположения в помещении. Что немало важно для распространения электромагнитных волн внутри помещения при наличии влияния местных предметов.

Перечисленные достоинства предлагаемого подхода позволяют решить задачу оптимального размещения в помещении источника электромагнитных волн по критерию максимального уровня мощности сигнала, либо найти области пространства помещения со значениями уровня мощности, излучаемого сигнала ниже заданного.

Как было отмечено в работе [7] отражение радиоволн в большей степени происходит при наличии гладкой поверхности с размерами, намного превышающими длину волны радиочастотного сигнала, т.е. отражение от стен зданий, мебели, оборудования внутри помещений. Характер отражения волны определяется электрическими и магнитными свойствами среды, геометрическими свойствами поверхности, а также параметрами падающей волны. В этом случае

основное внимание должно быть сосредоточено на определении комплексного коэффициента отражения  $\dot{\Gamma}$ , имеющего существенное значение для моделирования указанного процесса.

Для определения комплексного коэффициента отражения  $\dot{\Gamma}$  от плоской поверхности можно воспользоваться известными формулами Френеля, перейдя к углам скольжения, и получить для горизонтальной и вертикально поляризации, соответственно:

$$\dot{\Gamma}_H = \frac{\sin \theta - \sqrt{\dot{n}_2 - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{\dot{n}_2 - \cos^2 \theta}}, \quad \dot{\Gamma}_V = \frac{\dot{n}_2 \sin \theta - \sqrt{\dot{n}_2 - \cos^2 \theta}}{\dot{n}_2 \sin \theta + \sqrt{\dot{n}_2 - \cos^2 \theta}}, \quad (6)$$

где  $\dot{n}_2$  — комплексный коэффициент преломления земной поверхности, определяемый как

$$\dot{n}_2 = n'_2 - jn''_2 = \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_a} \right)^2} + 1 \right)} - j \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_a} \right)^2} - 1 \right)}, \quad (7)$$

где  $\mu$ ,  $\varepsilon$ ,  $\sigma$  — относительные магнитная, диэлектрическая проницаемости и удельная проводимость земной поверхности, соответственно.

Для большинства видов поверхности значением параметра  $\mu$  можно пренебречь (т.е. принять  $\mu = 1$ ), так как магнитные свойства таких поверхностей минимальны. Значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь в диапазоне 2–7 ГГц для некоторых материалов, используемых при отделке современных помещений, приведены в таблице 1 [8].

Таблица 1

Материал	Относительная диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла потерь
Оргстекло	2,74	$3,2 \cdot 10^{-4}$
Жалюзи (закрытые)	3,49	$5,96 \cdot 10^{-5}$
Жалюзи (открытые)	1,96	$5,96 \cdot 10^{-5}$
Красный кирпич (сухой)	5,86	$1,16 \cdot 10^{-1}$
Красный кирпич (влажный)	5,92	$1,17 \cdot 10^{-1}$
Ковер	1,32	$5,96 \cdot 10^{-4}$
Потолочное покрытие	1,32	$1,44 \cdot 10^{-2}$
Ткань	1,49	$5,96 \cdot 10^{-5}$

Стекловолокно	1,02	$9,21 \cdot 10^{-4}$
Стекло	6,38	$2,6 \cdot 10^{-2}$
Линолеум	3,08	$1,45 \cdot 10^{-3}$
Хвойная доска	2,58	$2,0 \cdot 10^{-1}$
ДСП	2,7	$1,1 \cdot 10^{-1}$
Фанера	2,47	$1,27 \cdot 10^{-1}$
Гипсовая плита	1,07	$4,29 \cdot 10^{-1}$
Кафель	3,08	$5,88 \cdot 10^{-2}$
Толь	2,47	$3,86 \cdot 10^{-2}$

Табличные данные показывают, что относительная диэлектрическая проницаемость материалов может отличаться более чем в шесть раз, а тангенс угла потерь – более чем в 1600 раз. Поэтому необходимо оценить степень влияния данного фактора на уровень мощности сигнала в рассматриваемой точке пространства помещения при постоянных всех прочих условиях.

На рисунках 2–4 представлены результаты расчетов по выражениям 1 и 5 при горизонтальной поляризации волн частотой 2,4 ГГц и высоте подъема передатчика 2,75 м над уровнем пола, приемника – 1 м в помещении шириной 20 м, длиной 40 м, высотой 3 м.

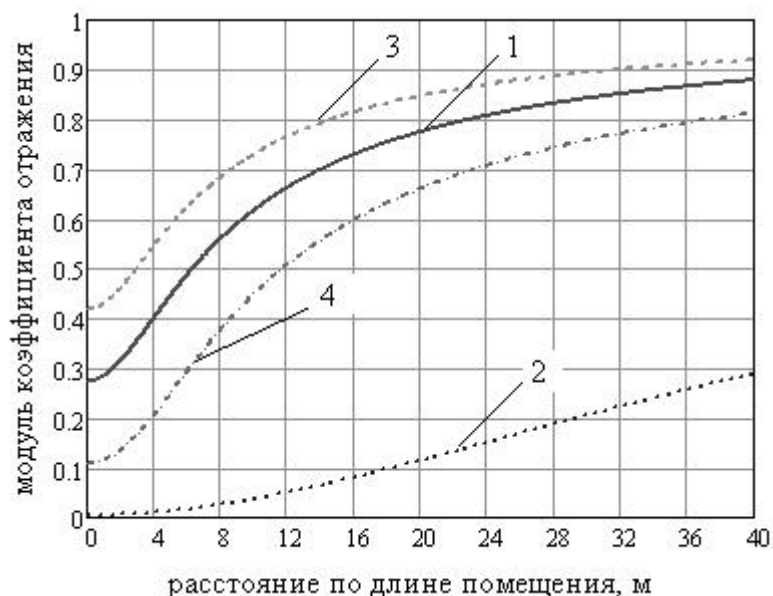


Рис. 2. Модуль комплексного коэффициента отражения при удалении точки приема от источника излучения по длине помещения: 1 – линолеум, 2 – стеклоткань, 3 – кирпич красный сухой, 4 – гипсовая плита



Медленное увеличение модуля комплексного коэффициента отражения при удалении точки приема от источника излучения по длине помещения сопряжено с меньшей глубиной провалов замираний сигналов.

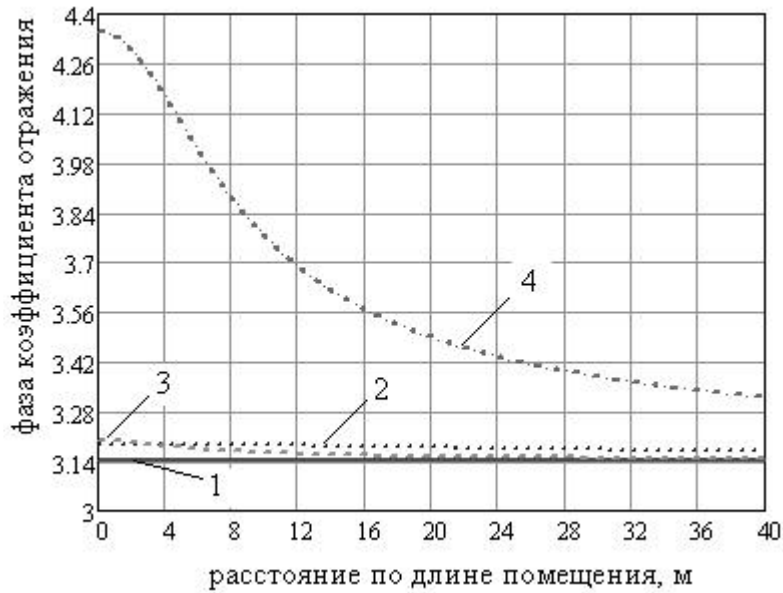


Рис. 3. Фаза комплексного коэффициента отражения при удалении точки приема от источника излучения по длине помещения: 1 – линолеум, 2 – стеклоткань, 3 – кирпич красный сухой, 4 – гипсовая плита

Резкая смена фазы комплексного коэффициента отражения приводит к смещению центров замираний сигнала в продольном прямолинейном удалении приемника от передатчика по длине помещения.

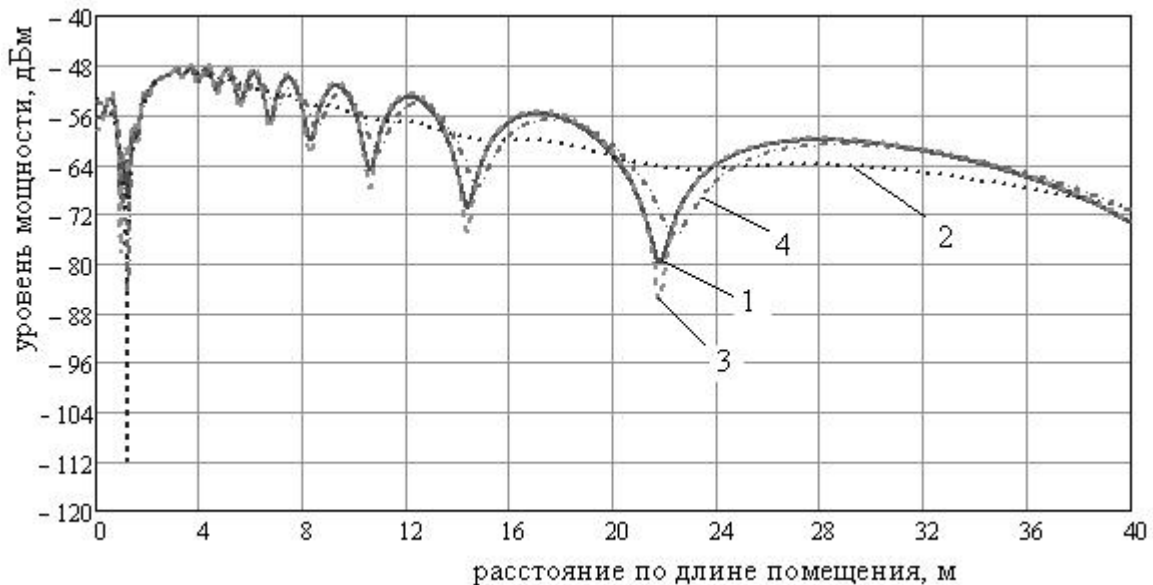


Рис. 4. Зависимость уровня мощности от расстояния до источника излучения при удалении точки приема по длине помещения: 1 – линолеум, 2 – стеклоткань, 3 – кирпич красный сухой, 4 – гипсовая плита

При достаточно близких значениях тангенса угла потерь и сильно различающейся относительной диэлектрической проницаемости материалов стеклоткани и красного сухого кирпича возникает значительная разница (более 20 дБм) при расчете уровня мощности отраженных от этих поверхностей электромагнитных волн.

Следует отметить, что на уровень мощности электромагнитных волн в помещении значительное влияние оказывают также и другие факторы, такие как дифракция и интерференция электромагнитных волн. Однако в ходе данного исследования была найдена взаимосвязь между материалом отражающей поверхности и уровнем сигнала электромагнитных волн с учетом направленных свойств передающей и приемной антенн.

Полученные результаты однократного отражения единичного луча могут быть использованы при создании более сложных математических моделей, учитывающих как многократное, так и многолучевое отражение электромагнитных волн внутри помещений различной формы. Такой подход к решению поставленной задачи позволит значительно повысить точность вычислений, особенно если учесть потери при поглощении и дифракционные потери каждой составляющей сигнала вдоль каждого пути его распространения. Возможно также использование эмпирических соотношений, откалиброванных при помощи экспериментальных данных.

Однако можно выделить и основные недостатки такого подхода. Например, необходимость максимально полного учета информации о планировке здания. Это вносит свои трудности при получении таких данных и показывает высокую чувствительность исходных данных к точности, выполняемых расчетов. В случаях, когда неточно указаны данные о параметрах стен или их местоположению, результаты расчета, вероятно, будут ухудшаться.

Адекватность предложенной математической модели подтвердилась результатами решения модельной задачи распространения электромагнитной волны на частоте 17 ГГц из широкого помещения в узкий коридор с измерени-

ем уровня мощности по всей длине коридора и сравнением результатов с экспериментальными данными [9].

На рис.5 и 6 представлены соответственно план исследуемого помещения, задающий основные геометрические параметры, точку установления источника электромагнитного излучения и зависимость уровня мощности в децибелах (отнесенных к милливатту мощности) от расстояния до источника сигнала.

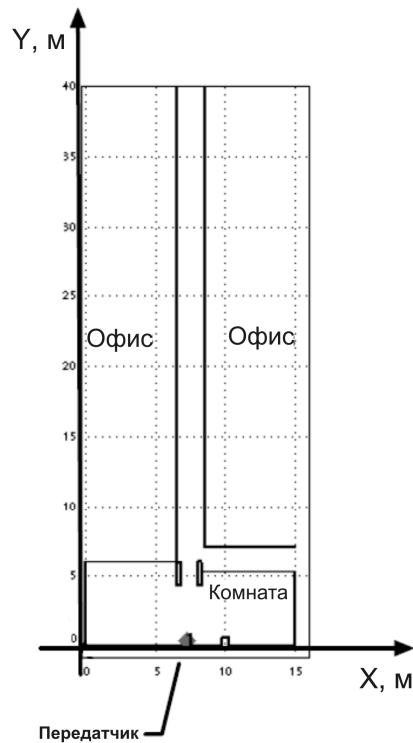


Рис. 5. План исследуемого помещения

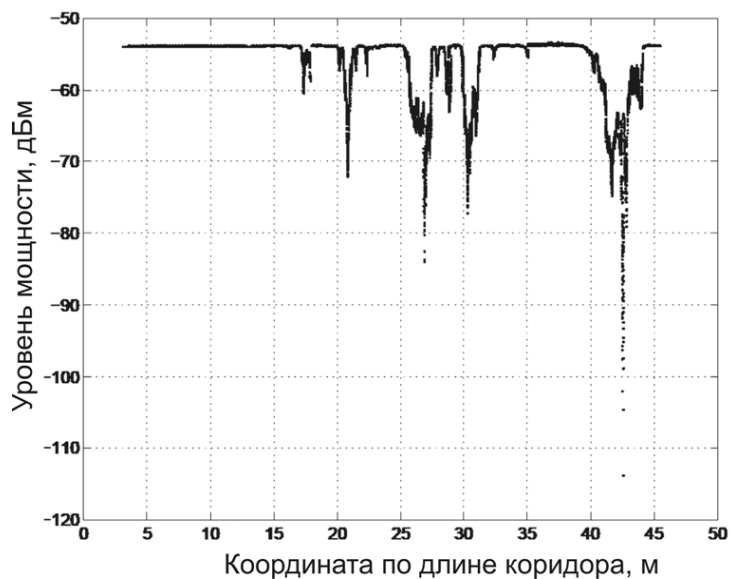


Рис. 6. Данные экспериментальных замеров уровня мощности в помещении сложной конфигурации

На рис. 7 приведены результаты расчета уровня мощности в продольном сечении помещения (вдоль всего коридора) с использованием математической модели, учитывающей наличие препятствий.

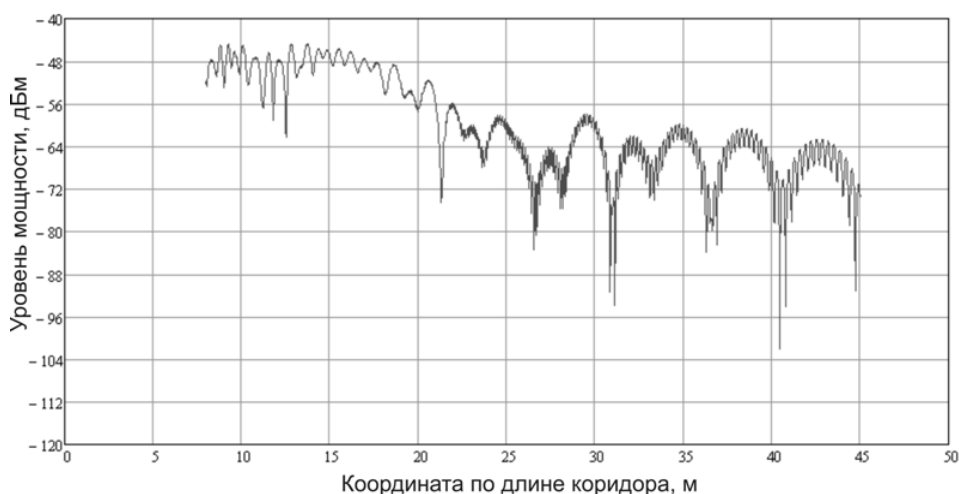


Рис. 7. Результаты математического моделирования в пакете MathCad

Анализ полученных результатов показывает следующее: общий уровень мощности излучения на обоих графиках одинаков; явно выраженные интерференционные замирания совпадают на удалении 21, 26, 31, 41 метров; модель достаточно точно указала места расположений интерференционных замираний и изменение уровня мощности сигнала с удалением от передатчика, даже при отсутствии данных о наличии дверных проемов, элементов конструкции здания в потолочной части и т.п.; незначительные расхождения объяснимы недостаточно полным описанием характеристик используемых в эксперименте антенн, материала отделки помещения и высот подъема антенн над уровнем пола.

Полученная математическая модель имеет точность, достаточную для представления реального электромагнитного поля и может быть использована, например, в системах поиска и радиочастотной идентификации персонала на территории контролируемых объектов в помещениях сложной формы с учетом их размеров, высоты размещения антенн, характеристик поверхностей помещения и объектов в нем вместо использования усредненных эмпирических коэффициентов [10].

Исследование выполнено в рамках НИР по проектной части государственного задания в сфере научной деятельности: № 8.389.2014/К «Информацион-

ные технологии анализа конструкций радиоэлектронных средств при воздействии внешних факторов».

### Литература

1. Гавриленко В.Б. Распространение радиоволн в современных системах мобильной связи/ В.Б. Гавриленко, В.А. Яшнов. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет, 2003. – 148 с.

2. Nata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service. IEEE Trans. Veh. Technol., 1980, v. VT-29, no. 3, p. 317-325.

3. Печаткин А.В. Системы мобильной связи. Часть 1. Принципы организации, функционирования и частотного планирования систем мобильной связи: Учебное пособие/ А.В. Печаткин. – Рыбинск: РГАТА, 2008. – 122 с.

4. Кочегаров И.И. Информационные технологии проектирования. Методология разработки и проектирования РЭС: учебн. пособие/ В.Б. Алмаметов, И.И. Кочегаров. – Пенза: Изд. ПГУ, 2013 – 76с.

5. Андреев П.Г. Основы проектирования электронных средств: учебное пособие / П. Г. Андреев, И. Ю. Наумова – Пенза: Изд. ПГУ, 2010 – 124 с.

6. Андреев П.Г. Защита радиоэлектронных средств от внешних воздействий: учеб. Пособие / П.Г. Андреев, И.Ю. Наумова // Пенза: Изд-во ПГУ, 2012.–130 с.

7. Андреев, П.Г. Моделирование распространения электромагнитных волн в помещениях/ П.Г. Андреев., М.С. Ширшов, А.Н. Якимов // Современные охранные технологии и средства обеспечения комплексной безопасности объектов : материалы IX Всероссийской научно-практической конференции (Россия, Пенза- Заречный, 18-20 сентября 2012 г.). – Пенза: Изд-во ПГУ, 2012. – С.325-331.

8. Ladrom, O., Feurstein, M.J., Rappaport, T.S. A comparison of theoretical and empirical reflection coefficients for typical exterior wall surfaces in a mobile radio environment/ O. Ladrom, M.J. Feurstein, T.S. Rappaport// IEEE Trans. Antennas Propagat., 1996, v. 44, pp. 341-351.

9. Fiacco, M.; parks, M.; radi, H.; saunders, S. R.: “Final Report – Indoor Propagation Factors at 17 GHz and 60 GHz”. Study carried out on behalf of the UK Radio Communications Agency, University of Surrey, Aug. 1998. – <http://www.radio.gov.uk> (дата обращения: 28.09.2012).

10. Андреев, П.Г. Моделирование распространения электромагнитных волн в помещении прямоугольной формы с учетом влияния местных предметов/ П.Г. Андреев, А.Н. Якимов, В.В. Князева // Сборник докладов 2-й Всероссийской Микроволновой конференции (Москва, 26-28 ноября 2014 г.). – М.: Изд-во JRE–ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2014. – С. 244-248.