

УДК 621.391

Математические модели многолучевого распространения радиосигнала в беспроводных сетях устройств малого радиуса действия

С.М. Строганова, старший преподаватель кафедры «Информационные технологии и управляющие системы»,

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

М.П. Шумилин, студент направления 09.04.03 «Прикладная информатика» (магистр),

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область

В работе рассматривается многолучевая модель распространения радиосигнала и даются оценки электромагнитного взаимодействия устройств малого радиуса действия при развертывании беспроводной сети внутри закрытых помещений.

Ключевые слова: Модель многолучевого распространения сигнала, беспроводные устройства малого радиуса действия, математическое моделирование

Mathematical models of multipath propagation of a radio signal in wireless networks of short-range devices

S.M. Stroganova, senior teacher of information technology and management systems department,

State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

M.P. Shumulin, student of the direction 09.04.03 «Applied Informatics» (master),

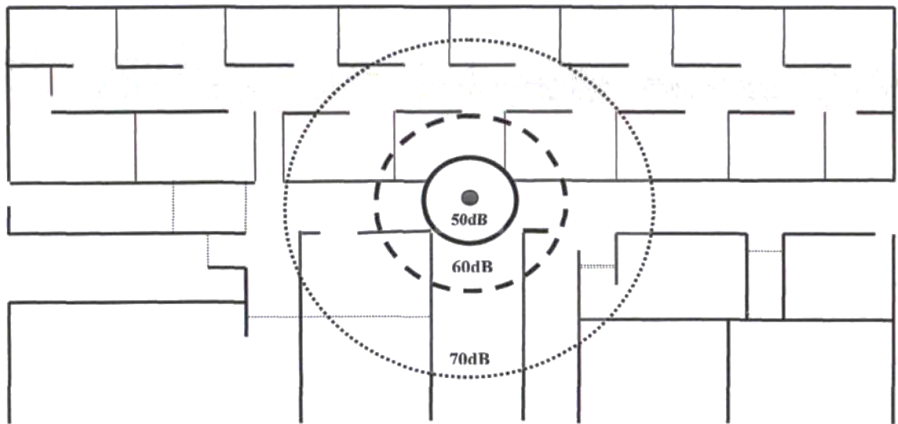
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region «Technological University named after twice Hero of the Soviet Union, pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region

Abstract: The article considers a multi-beam model of radio signal propagation and assesses electromagnetic interaction of small-range devices when deploying a wireless network inside indoor premises.

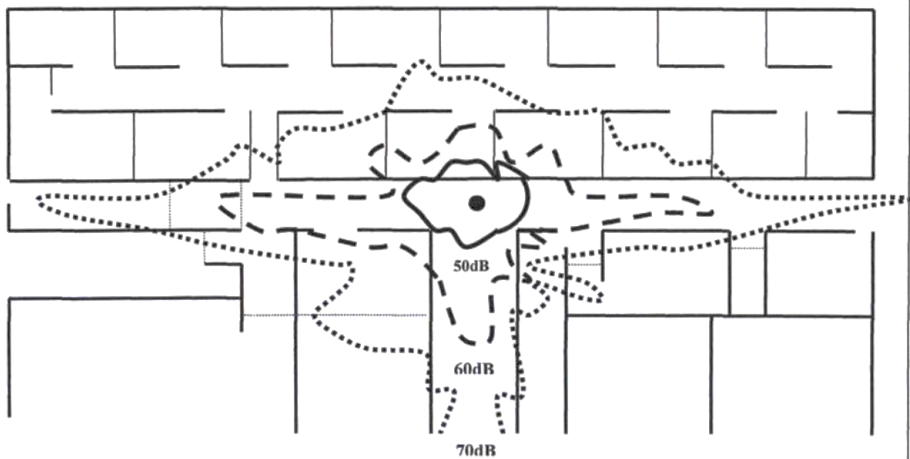
Keywords: Multi-beam signal propagation model, small-range wireless devices, mathematical modeling

Широкая востребованность новых технологий для устройств малого радиуса действия (УМРД) в разных сферах деятельности обуславливает актуальность исследования вопросов связанных с развертыванием беспроводных сетей. Важным достоинством беспроводных сетей является их быстрое разворачивание, масштабирование и поддержка при обслуживании. Одна из проблем, которая связана с развертыванием сетей беспроводного доступа с использованием УМРД, связана с прогнозом зон эффективной работы, когда УМРД расположены в закрытых помещениях.

При разработке методов расчета оценок помехоустойчивости устройств малого радиуса действия необходимо учитывать механизмы распространения радиоволн для различных вариантов размещения устройств. Если УМРД располагаются на открытой местности, то распространение радиоволн характеризуются такими эффектами как: прохождение и отражение от земной поверхности с учетом рельефных неоднородностей, потери при распространении, связанные с различными атмосферными явлениями, например, рассеивании энергии радиоволн на атмосферных образованиях или нерезонансные поглощения частицами в атмосфере и др. Если УМРД располагаются внутри помещений, то необходимо учитывать такие эффекты как замирание, экранирование, потери энергии при отражениях от стен, пола, потолка помещения [4]. На рисунке 1 приводится пример распределения уровней радиосигнала УМРД при наличии коридоров в помещении. Наличие коридоров и их ориентация оказывают влияние на уровень сигнала УМРД. При этом считается, что высота помещения много больше, чем расстояние между источниками УМРД и случай, когда УМРД располагаются в закрытом помещении, и высота которых сопоставима с расстоянием между УМРД.



а)



б)

Рисунок 1 – Модели распределения уровней радиосигнала при наличии коридоров в помещении: а) – идеальное б) – реальное [4]

При распространении радиоволн внутри помещения напряженность энергии волн зависит от количества коридоров и препятствий, а также от материала препятствий [4]. На рисунке 2 показана структурная схема распространения радиоволн.

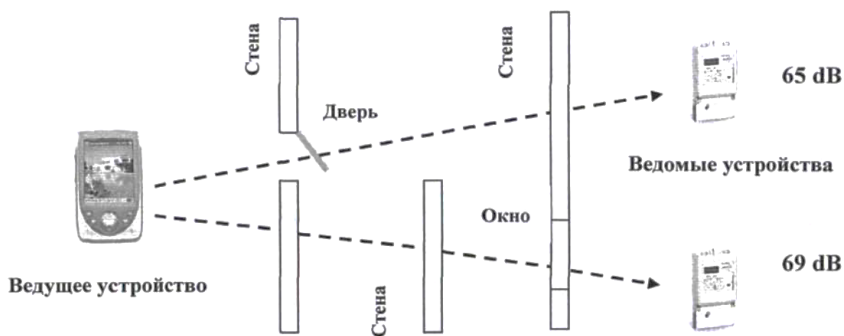


Рисунок 2 – Ослабление радиосигнала при наличии препятствий [4]

Потери мощности сигнала в открытой местности могут быть вычислены по формуле:

$$A_0 = 10lgG_m + 10lgG_s + 20lg\left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right),$$

где G_m – коэффициент усиления УМРД – источника (ведущее устройство), G_s – коэффициент усиления УМРД – приемника (ведомое устройство), L – расстояние между УМРД, λ – длина волны.

Рассмотрим случай, когда расстояния между УМРД значительно меньше чем высота помещения, в которой располагаются сами эти устройства.

На рисунке 3 показано схема двухлучевой аппроксимации распространения радиоволн между устройствами пикосети: присутствуют только прямая волна и отраженная от поверхности.

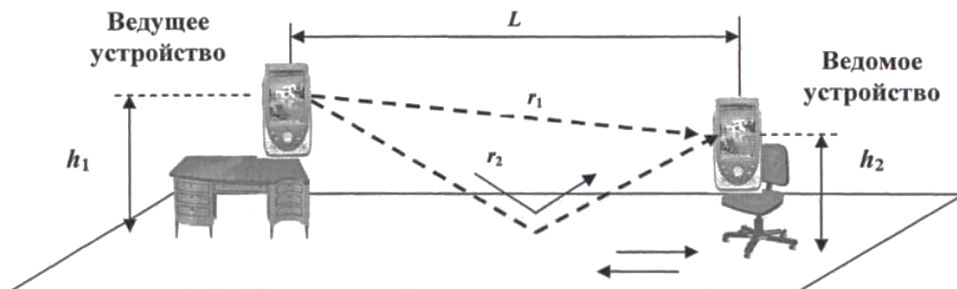


Рисунок 3 – Схема двухлучевой аппроксимации распространения волн [4]

По следующей формуле находится угол падения:

$$\Theta(L, h_1, h_2) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg}\{(h_1 + h_2)L^{-1}\}$$

Путь отраженной и прямой волн определяются соотношениями соответственно:

$$r_1(L, h_1, h_2) = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + L^2}$$

$$r_2(L, h_1, h_2) = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + L^2}$$

Напряженность прямой и напряженность отраженной волн определяют результирующее значение напряженности:

$$\dot{E}_c = \dot{E}_{\text{пр}} + \dot{E}_{\text{отр}}$$

Напряженность электрического поля в точке расположения приемника радиосигнала для прямой волны можно найти по формуле:

$$\dot{E}_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{60P}}{r_1} \exp[-j(\frac{2\pi}{\lambda})r_1]$$

Тогда в приемнике можем найти напряженность электрического поля по формуле [4]:

$$\dot{E}_{\text{отр}} = \frac{\sqrt{60P}}{r_2} \dot{F} \exp[-j(\frac{2\pi}{\lambda})r_2]$$

Таким образом для результирующей напряженности получим:

$$\dot{E}_c = \frac{\sqrt{60P}}{r_2} \left\{ 1 + \frac{r_1}{r_2} \dot{F} \exp[-j(\frac{2\pi}{\lambda})\Delta r] \right\}$$

где $\Delta r = r_2 - r_1$ – разность хода волн.

Согласно работам [3; 4] в освещенной зоне можно определить множитель ослабления по формуле:

$$W = 1 + \frac{r_1}{r_2} \dot{F} \exp[-j(\frac{2\pi}{\lambda})\Delta r]$$

Модуль этого множителя определяется как:

$$|W| = \sqrt{1 + \left(\frac{r_1}{r_2} |\dot{F}|\right)^2 + 2 \frac{r_1}{r_2} |\dot{F}| \cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta r + \arg \dot{F}\right]}$$

Квадрат модуля ослабления напряженности волны:

$$S = 1 + \left(\frac{r_1}{r_2} |\dot{F}|\right)^2 + 2 \frac{r_1}{r_2} |\dot{F}| \cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)\Delta r + \arg \dot{F}\right]$$

Направления поляризации волны, диэлектрическая проницаемость, высота, на которой располагаются ведущее и ведомое устройство определяют значение коэффициента ослабления.

На рисунке 4 приведена зависимость этого показателя для волны, которая вертикально поляризована, от расстояния между УМРД. Рассмотрен случай, когда меняется высота ведущего устройства.

Амплитуда квадрата модуля множителя растет с увеличением расстояния между устройствами. Это обусловлено тем, что при угле падения волны, близком к 90° , когда увеличивается расстояние между источниками, коэффициент отражения тоже возрастает

На рисунке 5 показаны аналогичные зависимости для волны, которая горизонтально поляризована. В этом случае амплитуда множителя ослабления растет.

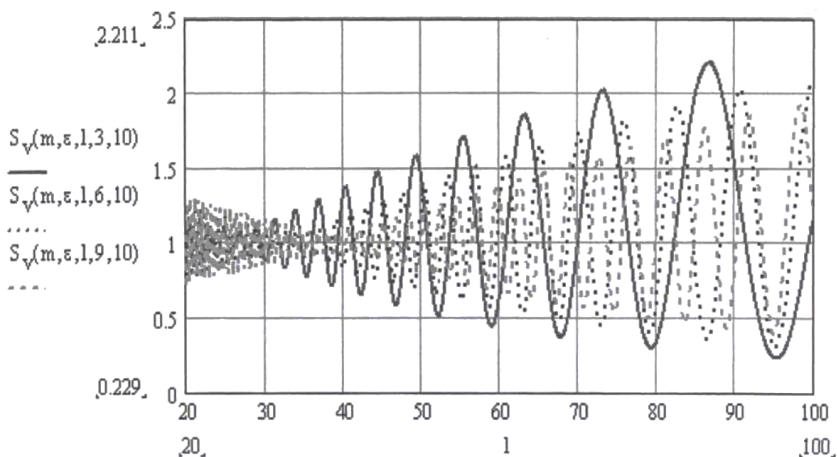


Рисунок 4 – Модуль ослабления суммарной волны с вертикальной поляризацией в зависимости от расстояния между УМРД-устройствами

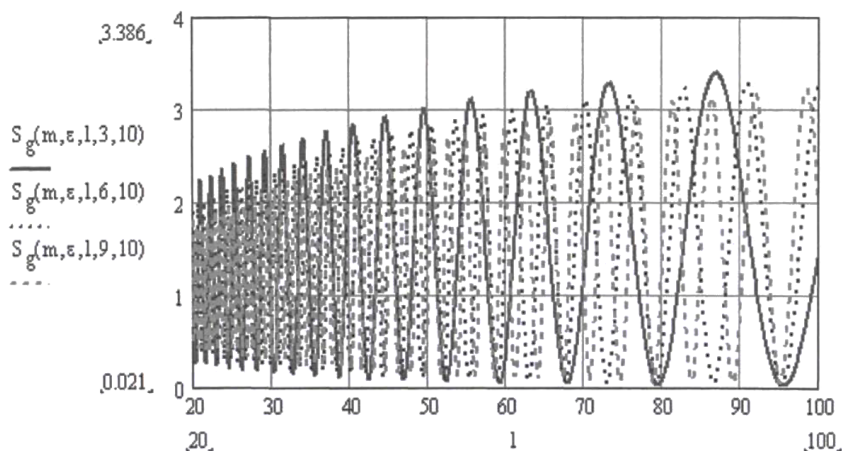


Рисунок 5 – Зависимость S от расстояниям между МРД-устройствами для волны, которая поляризована горизонтально.

Если не известно направление поляризации, то коэффициент можно найти по следующей формуле (поляризация произвольная):

$$S_v(m, \varepsilon, L, h_1, h_2, \xi) = \sqrt{(S_v(m, \varepsilon, L, h_1, h_2) \cos(\xi))^2 + (S_v(m, \varepsilon, L, h_1, h_2) \sin(\xi))^2}$$

На рисунке 6 приводится кривая связи модуля ослабления для разных углов поляризации волны. Видно, что угол поляризации волны влияет на амплитуду S .

Таким образом, можно сделать вывод, что высота расположения устройства и расстояние до отражающей поверхности определяют частоту колебаний суммарной волны.

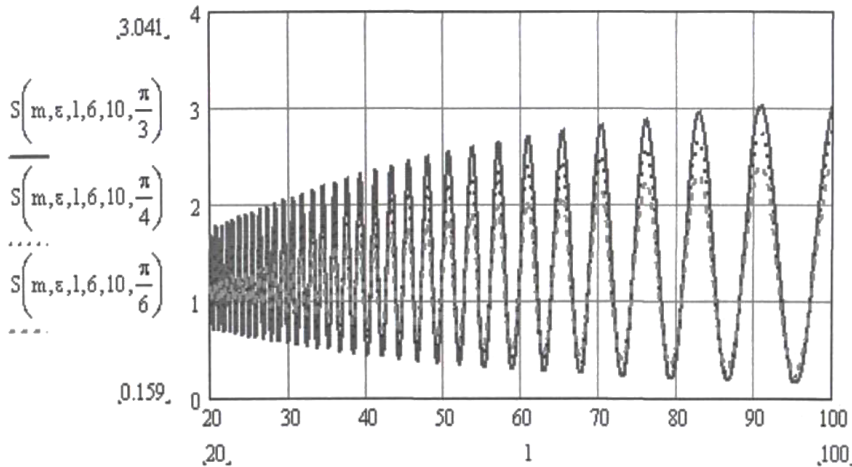


Рисунок 6 – Модуль ослабления суммарной волны при разных углах поляризации в зависимости от расстояния между УМРД-устройствами

Рассмотрим случай, когда устройства малого радиуса действия располагаются в закрытом помещении, высота стен которого соизмерима с радиус действия УМРД. На рисунке 7 приводится схема трехлучевой аппроксимации, учитывающей взаимодействие волн с полом, потолком и стенами. Согласно схеме при трехлучевой аппроксимации разности длин волн определяются выражениями:

$$r_1 = \sqrt{(h_2 - h_1)^2 + L^2},$$

$$r_2 = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + L^2},$$

$$r_3 = \sqrt{(2H - h_1 - h_2)^2 + L^2},$$

Тогда для Δr можно записать:

$$\Delta r_2 = r_2 - r_1,$$

$$\Delta r_3 = r_3 - r_1.$$

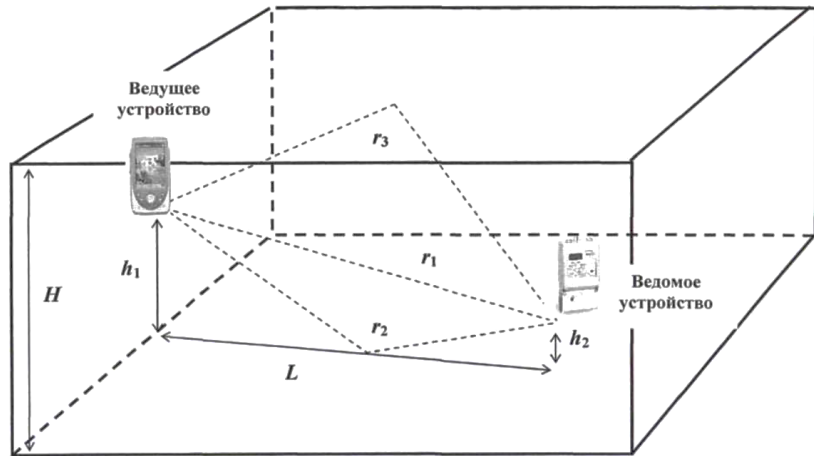


Рисунок 7 – Схема трехлучевой аппроксимации распространения волн

Итоговую напряженность поля как результат суммы напряженностей поля в области, где расположен приемник радиосигнала можно определить следующим выражением:

$$\dot{E}_c = \dot{E}_{\text{пр}} + \dot{E}_{\text{отр2}} + \dot{E}_{\text{отр3}},$$

Здесь первое слагаемое обозначает напряженность поля в точке расположения ведомого УМРД, это точка приема радиосигнала для прямой волны; второе слагаемое обозначает напряженность для случая отраженной от пола помещения волны, третье слагаемое – напряженность волны, которая отражается от потолка помещения.

Комплексный множитель ослабления определяется как:

$$\dot{W} = 1 + \frac{r_1}{r_2} \dot{F}_2 \exp \left[-j \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta r_2 \right] + \frac{r_1}{r_3} \dot{F}_3 \exp \left[-j \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta r_3 \right]$$

На основе геометрических построений можно определить угол отражения радиосигнала для волны, которая отражается от пола помещения:

$$\Theta_2(L, h_1, h_2) = \frac{\pi}{2} - \text{arctg} \left(\frac{h_1 + h_2}{L} \right)$$

Аналогичным образом определяется угол отражения радиосигнала для волны, которая отражается от потолка помещения:

$$\Theta_3(L, h_1, h_2) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \left(\frac{2H - h_1 - h_2}{L} \right)$$

Тогда можно определить квадрат параметра S , который будет определять ослабление напряженности радиоволны по следующей формуле [1]:

$$S = 1 + \left(\frac{r_1}{r_2} |\dot{F}_2| \right)^2 + \left(\frac{r_1}{r_3} |\dot{F}_3| \right)^2 + 2 \frac{r_1}{r_2} |\dot{F}_2| \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta r_2 + \arg \dot{F}_2 \right] + 2 \frac{r_1}{r_3} |\dot{F}_3| \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) \Delta r_3 + \arg \dot{F}_3 \right] + 2 \frac{r_1^2}{r_2 r_3} |\dot{F}_2| |\dot{F}_3| \cos \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) (\Delta r_2 - \Delta r_3) + \arg \dot{F}_2 - \arg \dot{F}_3 \right]$$

На рисунке 8 показаны результаты расчета кривой зависимости модуля ослабления от расстояния между устройствами УМРД. Волна вертикально поляризована. Как видно из графика множитель ослабления зависит от высоты ведущего УМРД. При высоте потолка равном 3 метра и высоте расположения ведомого УМРД в 1,5 м отраженные волны складывается в фазе.

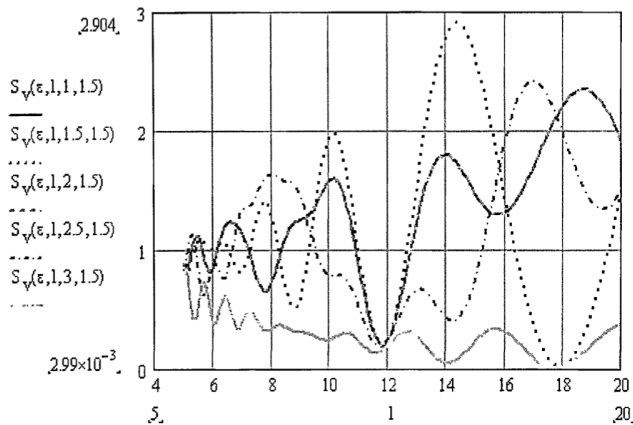


Рисунок 8 – Модуль ослабления суммарной волны с вертикальной поляризацией в зависимости от расстояния между УМРД-устройствами

На рисунке 9 приводятся данные аналогичного расчета для волны, которая поляризована горизонтально.

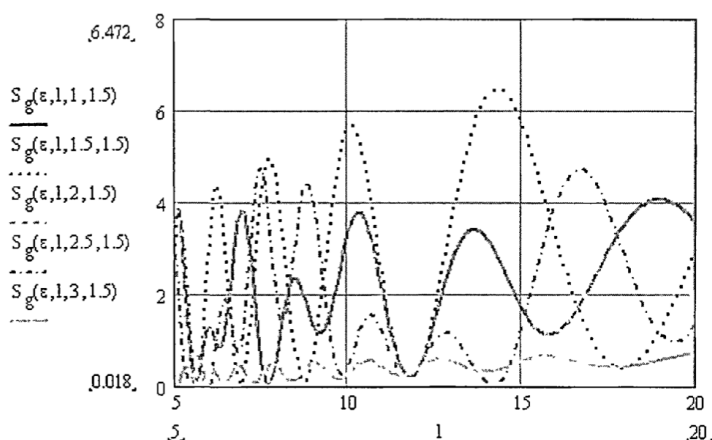


Рисунок 9 – Зависимость модуля S от расстояния между УМРД (волна поляризована горизонтально)

Если волна поляризована произвольно, то параметр S определяется по формуле:

$$S(\varepsilon, L, h_1, h_2, \xi) = \{(S(\varepsilon, L, h_1, h_2) \cos(\xi))^2 + (S(\varepsilon, L, h_1, h_2) \sin(\xi))^2\}.$$

На рисунке 10 приводится зависимость этого модуля от расстояния между устройствами УМРД для разных углов поляризации волны. Высота потолка составляет 3 метра. Из графиков можно заключить, что угол поляризации волны определяет амплитуду множителя ослабления.

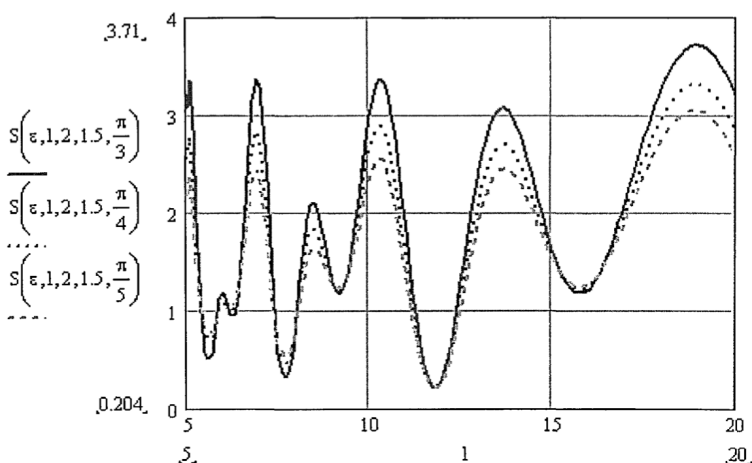


Рисунок 10 – Ослабление результирующей волны для случая произвольной поляризации в зависимости от расстояния между УМРД-устройствами

Для модели пятилучевой аппроксимации необходимо учитывать отражение волн от потолка, стен и других предметов. Для упрощения будем считать, что лучи отражаются от пола, потолка и двух стен. На рисунке 11 показаны кривые зависимости от удаления УМРД параметра S , рассчитанного для модели пятилучевой аппроксимации аналогично приведённым выше формулам. Волна поляризована вертикально, $H=3\text{м}$.

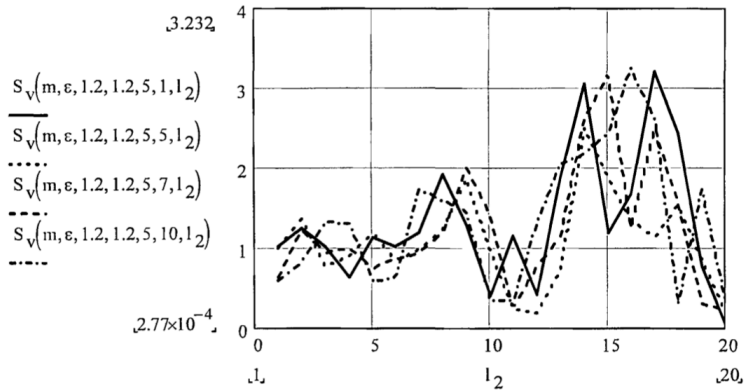


Рисунок 11 – Зависимость модуля S от расстояния между УМРД. Волна поляризована вертикально

На рисунке 12 представлен расчет зависимости от расстояния между УМРД квадрата модуля ослабления S для волны с горизонтальной поляризацией, высота равно 3м. На рисунке 13 представлена зависимость от удаления УМРД квадрата модуля затухания волны S с произвольной поляризацией, высота равна 3м. Видно, что от угла поляризации значение параметра S практически не зависит.

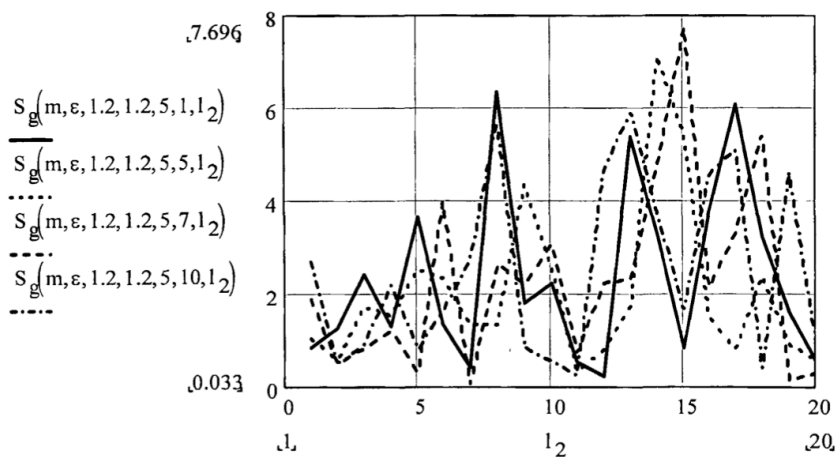


Рисунок 12 – Зависимость модуля S от расстояния между УМРД. Волна поляризована горизонтально

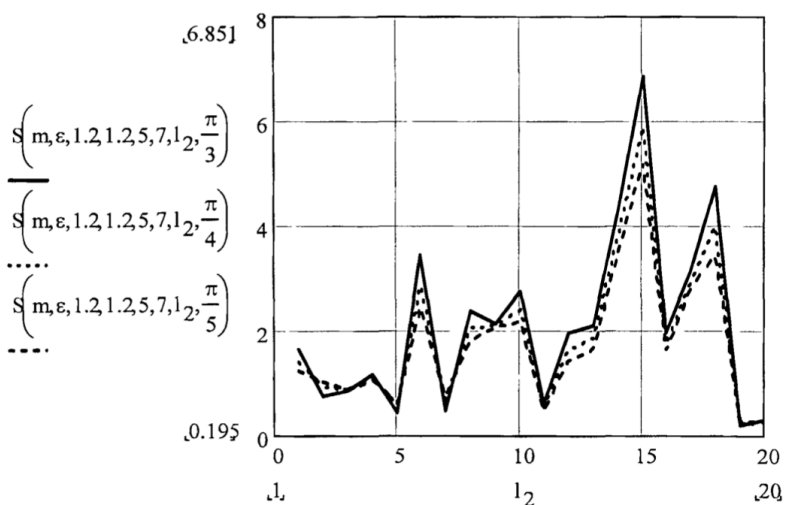


Рисунок 13 – Зависимость модуля S от расстояния между УМРД. Волна поляризована произвольно

Можно заключить, что разные направления поляризации волны определяют различные значения амплитуды колебаний напряженности электрического поля. Расположение УМРД-устройств определяет характер колебаний напряженности.

Выводы

В рамках двух-, трех- и пятилучевой моделей аппроксимации получены оценки напряженности электрического поля, когда УМРД-

устройства располагаются внутри закрытого помещения. В зависимости от взаимного расположения источника и приемника УМРД меняется характер колебаний электрического поля, а направление поляризации волны определяет амплитуду колебания напряженности электрического поля.

Литература

1. Артюшенко В.М., Корчагин В.А. Анализ особенностей распространения радиоволн в пикосетях беспроводных устройств малого радиуса действия // Промышленный сервис. № 4 (31). 2009. – С. 32-37.
2. Кон Е.Л., Фрейман В.И. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры. – Пермь: изд-во Перм.гос.техн.ун-та. 2007. – 312 с.
3. Тузов Г. И., Сивов В. А., Прытков В. И. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами – М.: Радио и связь, 1995. – 264 с.
4. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра. – М.: Радио и связь, 2009. – 520 с.