

УДК 621.396

Д.Г.Панарин, А.В.Данилова  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В КАНАЛАХ СВЯЗИ ПРИ  
ЭФФЕКТАХ ЗАТУХАНИЯ**

*Воронежский институт высоких технологий  
ОАО Концерн «Созвездие»*

*В данной работе обсуждаются проблемы, связанные с распространением радиосигналов в беспроводных системах связи для загородных и городских трасс. Указаны основные причины возникновения потерь. Отмечены основные недостатки подходов, предложенных Окамурой и Хатой. Предложено использовать модель плоскостной среды для учета особенностей земного покрова на трассе. Приведены выражения для коэффициентов отражения и прохождения. Использовалось борновское рассеяние электромагнитной волны на элементе растительности, расчет рассеянных полей осуществлялся на основе метода моментов при решении интегральных уравнений. Проведено сравнение амплитуд волн, полученное на основе 2 методов – релеевского рассеяния и метода моментов.*

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, радиосвязь, метод моментов, помехи, затухание.

Для загородных трасс, которые являются сложными с точки зрения рельефа, а также в условиях горных территорий среди проблем, требующих своего эффективного решения, можно отметить то, что возникают ситуации, когда радиосвязь пропадает или полностью отсутствует. Это можно наблюдать вследствие того, что, число приемопередающих устройств в подобных местах, обычно, заметно меньше, чем в городских условиях [1, 2]. Для того, чтобы решать возникающие проблемы можно использовать три подхода [3].

В первом подходе требуется располагать рядом с основной базовой станцией дополнительного передатчика. Во втором подходе повышают КПД и выходную мощность вследствие того, что уменьшается уровень нелинейных искажений в системе. В третьем подходе улучшается структура устройств, включающих в себя антенны и осуществляют процессы оптимизации для действующих моделей и алгоритмов, связанных с процессами распространения радиоволн по загородным трассам и в условиях горных местностей.

Можно отметить, что первый указанный способ, направленный на улучшение связи в условиях сложных с точки зрения рельефа загородных и горных трассах будет достаточно дорогостоящим и не всегда осуществимым.

Особенностью второго подхода является то, что несмотря на действительные полезные свойства антенных решеток с точки зрения использования радиоканалов, в них, тем не менее, наблюдаются основные

недостатки, присущие для многоканальных систем – межканальная и межсимвольная интерференция, а также существуют нелинейные искажения [4]. Обычные антенны не могут использоваться при отслеживании местоположения абонентов и, в этой связи, требуется их излучение сигнала с большей мощностью. Это обстоятельство может привести к тому, что возникает интермодуляция между сигналами, относящихся к одной и той же антенне или сигналами соседних антенн. С тем, чтобы получить большие мощности, системы передачи функционируют в режимах насыщения и, исходя из этого, в них можно отметить ярко выраженные нелинейные передаточные характеристики (ПХ): амплитудную (АХ), которая определяет зависимость выходной мощности от входной и фазо-амплитудную (ФАХ), которая определяет зависимость фазы от входной мощности того сигнала, который усиливается.

В результате возникают интермодуляционные составляющие (ИМС), которые относятся к усилительным трактам передатчиков, что определяет для радиосистем передачи информации уменьшение помехоустойчивых свойств, снижение пропускной способности, уменьшаются выходная мощность и КПД, увеличиваются фазовые искажения и т.д. [5]. Когда решаются подобные задачи, то это непосредственным образом касается формирования линейных свойств в передающих компонентах радиоустройств в радиосистемах при условиях ограничения энергетических ресурсов.

При рассмотрении третьего подхода учитывают, что в реальных условиях земная поверхность во многих местах имеет сложный рельеф и является слоистой по своей структуре, так как ее формируют горные породы, обладающие неоднородными электрическими характеристиками, во многих случаях на ней есть растительность и д.р. В этой связи вопросы, касающиеся прогнозирования полей поверхностных электромагнитных волн над реальными земными поверхностями при учете рельефа местности, растительных покровов и электрической неоднородности подстилающих сред в существующих условиях остаются не решенными.

Для цифровых радиосистем связи вероятность ошибки определяется нормированным отношением сигнал/шум [6].

То, что отношение сигнал/шум уменьшается, может быть связано с тем, что уменьшается мощность сигнала, который излучается передатчиком в радиосистеме связи, повышается мощность шума или мощность сигналов, которые интерферируют с полезными сигналами [7].

Подобные механизмы называют, соответственно, потерями (то есть, происходит ослабление) и шумом (происходят эффекты интерференции). Эффекты ослабления могут возникать в результате того, что поглощается

энергия передаваемых полезных сигналов, отражается часть энергии сигналов или происходит рассеяние.

Можно отметить различные источники шумов и интерференции – тепловые шумы, галактический шум, существование атмосферных и промышленных помех, наличие интермодуляционных, перекрестных и интерферирующих сигналов от других источников.

Укажем теперь – в связи, с чем появляются потери.

1. Потери, определяются тем, что ограничивается полоса каналов.
2. Существует межсимвольная интерференция.
3. Есть вклад от модуляционных потерь.
4. Возникают интермодуляционные искажения, относящиеся к мощным каналам радиопередающих устройств.
5. Существуют потери, связанные с поляризационными эффектами.
6. При распространении сигнала в пространстве происходит его затухание.
7. Сигналы соседних каналов накладываются друг на друга.
8. Существует влияние атмосферных и галактических шумов.
9. Есть вклад от собственных шумов приемника.
10. Антенно-фидерных тракт характеризуется собственными потерями.

Проведем рассмотрение основных причин и последствий многолучевости распространения электромагнитных волн по каналам связи [8, 9].

В качестве основных физических процессов, которые определяют многолучевые свойства распространения радиоволн для радиосистем беспроводной связи в городских условиях, можно назвать процессы отражения, дифракции и рассеяния [10, 11].

Электромагнитные волны отражаются, когда на трассе существует гладкая поверхность, у которой размеры, значительным образом превышают длину волны в радиочастотном сигнале. Для систем беспроводной связи процессы отражения электромагнитных волн могут наблюдаться от поверхности Земли, конструкций зданий, различных неровностей земной поверхности.

Процессы дифракции электромагнитных волн существуют, когда между передатчиками и приемниками есть объекты, имеющие размеры, превышающие длину волны, и препятствующие тому, чтобы сигналы распространялись прямым образом. Как результат дифракции, электромагнитные волны могут приходиться на приемную антенну даже при условиях прямой видимости между передатчиками и приемниками.

Для городских условий происходит дифракция электромагнитных волн на кромках домов, автомобилей и различных других телах. Если рассматривать загородные условия, то дифракцию наблюдают на кромках соответствующих препятствий, это могут быть вершины горных образований, кромки лесов, скал и др.

Процессы рассеяния электромагнитных волн можно наблюдать при существовании шероховатых поверхностей или тел, размеры которых будут малыми, если сравнивать с длиной волны [12-16]. Для городских условий эффекты рассеяния радиоволн могут быть на фонарном столбе, дорожном знаке, дереве и др. Если говорить о загородных условиях, то процессы рассеяния наблюдают, когда идет взаимодействие электромагнитных волн с элементами мелкой растительности, например – это ветки кустарников, есть мелкие неровности почвы, например на вспаханной земле.

Размер характерного смещения приемных антенн, которое соответствует мелкомасштабным замираниям, можно оценить приблизительно равным половине длины волны.

Для логарифмически нормально распределенного замирания радиоволн можно отметить, что оно будет сравнительно медленно меняющейся функцией координат приемника. Если приемная антенна в системах беспроводной связи перемещается, то для замираний в пространстве можно сопоставить в качестве эквивалента временные вариации сигнала.

Исследователь Окамура [11] провел в системах мобильной связи множество измерений параметров затухания для трасс, имеющих различную протяженность, при разных высотах передающей и приемной антенн. Исходя из того, какие были получены результаты, связанные с измерениями, ученым Хатой были предложены эмпирические формулы, которые давали возможности для расчетов затухания сигналов.

В тех случаях, когда принимаемые сигналы представляют собой сумму совокупности многолучевых сигналов и сигнала, относящегося к прямой видимости, который имеет значительную амплитуду, то тогда для амплитуды огибающей ставится в соответствие райсовская функция распределения плотности вероятности.

В случае мелкомасштабного замирания его можно определить на основе двух подходов:

- за счет того, что расширяются цифровые импульсы сигнала;
- вследствие того, что для характеристик канала, связанного с тем, что мобильная станция движется, возникают заметные изменения во времени.

Различные механизмы замираний мы можем анализировать на основе двух способов – временном и частотном [17]. Если используется временная область, то расширение сигнала, которое определяется

многолучевостью, имеет время задержки, а если рассматривается частотная область, то для нее характерна полоса когерентности. Аналогичным образом нестационарные характеристики во временной области будут связаны со временем когерентности сигналов, а если рассматривают частотную область, то будет их связь с тем, насколько быстро происходит замирание или доплеровское расширение.

Модель Окамуры довольно часто используется на практике.

В этой модели применяются простые соотношения для того, чтобы проводить расчеты без учета особенностей физических процессов. В ней не происходит учета согласованности пропускной способности, затуханий в области атмосферы, эффектов деполяризации.

Также, она приводит к большим ошибкам, если происходит изменение высот антенн или их ориентации. При использовании статистических методов получаются ошибки оценок затуханий сигнала, которые будут сравнимы с промахами.

Если рельеф земной поверхности не является регулярным, то эффективным является использование подхода, связанного с геометрической оптикой (ГО) и трассировкой лучей [11, 19].

Если рассматривать реальные случаи, то для подстилающей поверхности трасс характерна слоистая структура [20].

Подобную трассу мы можем представить на основе различных моделей:

- в виде плоскостлой среды, имеющей гладкие границы;
- в виде среды, имеющей шероховатые границы.

Рассмотрим особенности математического описания плоскостлой среды. Для того, чтобы определить коэффициенты отражения электромагнитных волн от плоскостлых сред, применяют разные математические подходы.

Например, при расчете коэффициентов прохождения и отражения электромагнитных волн от плоскостлых сред, которые содержат более, чем один слой диэлектрика, во многих случаях прибегают к матричному подходу, описанному в [21, 22].

Каждый из слоев плоскостлых сред может быть описан на основе характеристической матрицы (или матрицы передачи), которая имеет разный вид для разных поляризаций (Рисунок 1):

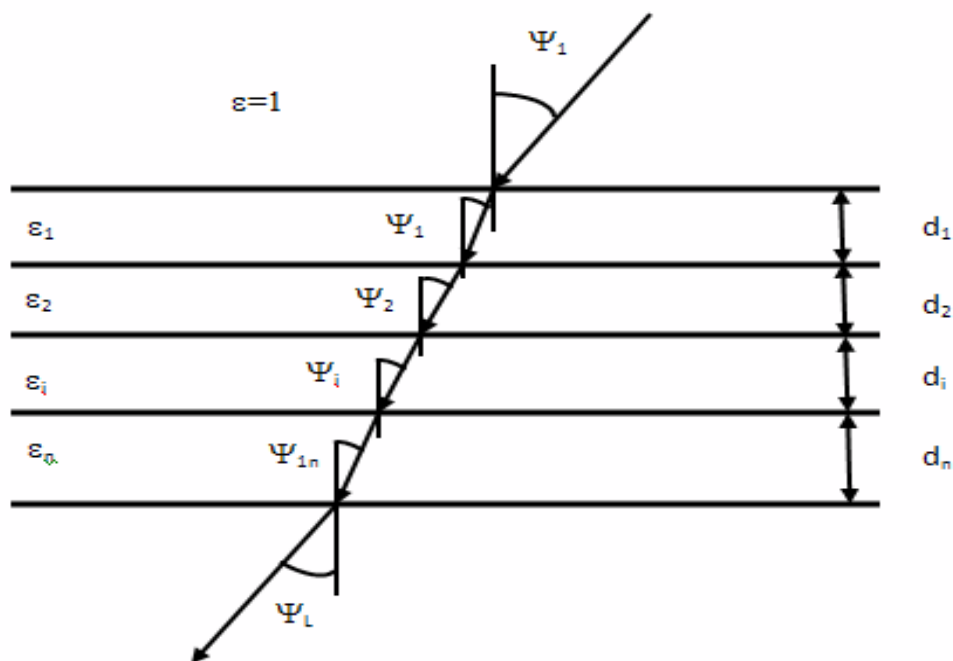


Рисунок 1 – Схема того, как волна проходит через плоскостойкую среду

$$M_{\text{ипарал}} = \begin{bmatrix} chj\gamma_i & \frac{W_0 \cos \Psi_1}{W_i \cos \Psi_i} shj\gamma_i \\ \frac{W_i \cos \Psi_i}{W_0 \cos \Psi_1} shj\gamma_i & chj\gamma_i \end{bmatrix} \quad , (1)$$

$$M_{\text{иперпендик}} = \begin{bmatrix} chj\gamma_i & \frac{W_i \cos \Psi_i}{W_0 \cos \Psi_1} shj\gamma_i \\ \frac{W_0 \cos \Psi_1}{W_i \cos \Psi_i} shj\gamma_i & chj\gamma_i \end{bmatrix} \quad , (2)$$

$$\gamma_i = \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_i (1 - jt g \delta_i)} \cos \Psi_i \quad , (3)$$

$$\Psi_i = \arcsin\left(\frac{\sin \Psi_1}{\text{Re}(\sqrt{\varepsilon_i (1 - jt g \delta_i)})}\right) \quad (4)$$

Для всей плоскостойкой среды используется матрица  $M_{\text{суммарное}}$ , она определяется на основе произведения всех матриц слоев, это произведение формируется в той же последовательности, какой происходит распространение сквозь стойкую среду электромагнитной волны [20].

$$M_{\text{суммарное}} = M_1 M_2 \dots M_n = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Для того, чтобы определить значения коэффициентов отражения и прохождения плоских волн через соответствующий слой, необходимо использовать элементы общей матрицы передачи плоскостойких сред [20]:

$$T_{\text{суммарное}} = \frac{2}{m_{11} + m_{21} + m_{12} + m_{22}}, \quad (6)$$

$$\Gamma_{\text{суммарное}} = \frac{(m_{11} + m_{12}) - (m_{22} + m_{21})}{m_{11} + m_{21} + m_{12} + m_{22}}, \quad (7)$$

При распространении электромагнитных волн над землей их затухание может быть связано с тем, что между передатчиком и приемником существует растительность. Наличие ветвей и листьев кустов и деревьев может привести к значительному ослаблению принимаемого сигнала или к изменению направлению движения волн. Беспроводной канал становится крайне сложным в этом случае из-за влияния на него лесной растительности.

Мы проводили расчеты в борновском приближении, при котором не происходит учета повторных рассеяний рассеянных волн (Рисунок 2).

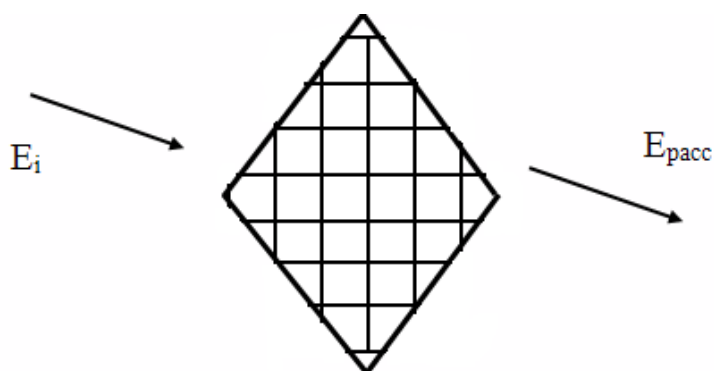


Рисунок 2 – Иллюстрация борновского рассеяния электромагнитной волны на элементе растительности

Решение задач, связанных с рассеянием электромагнитных волн на таких диэлектрических структурах может быть связано с использованием интегральных уравнений и метода моментов.

Рассеянное поле связано с токами, определяемыми при решении соответствующего матричного уравнения [23].

На рисунке 3 проведено сравнение амплитуд волн, полученное на основе 2 методов.

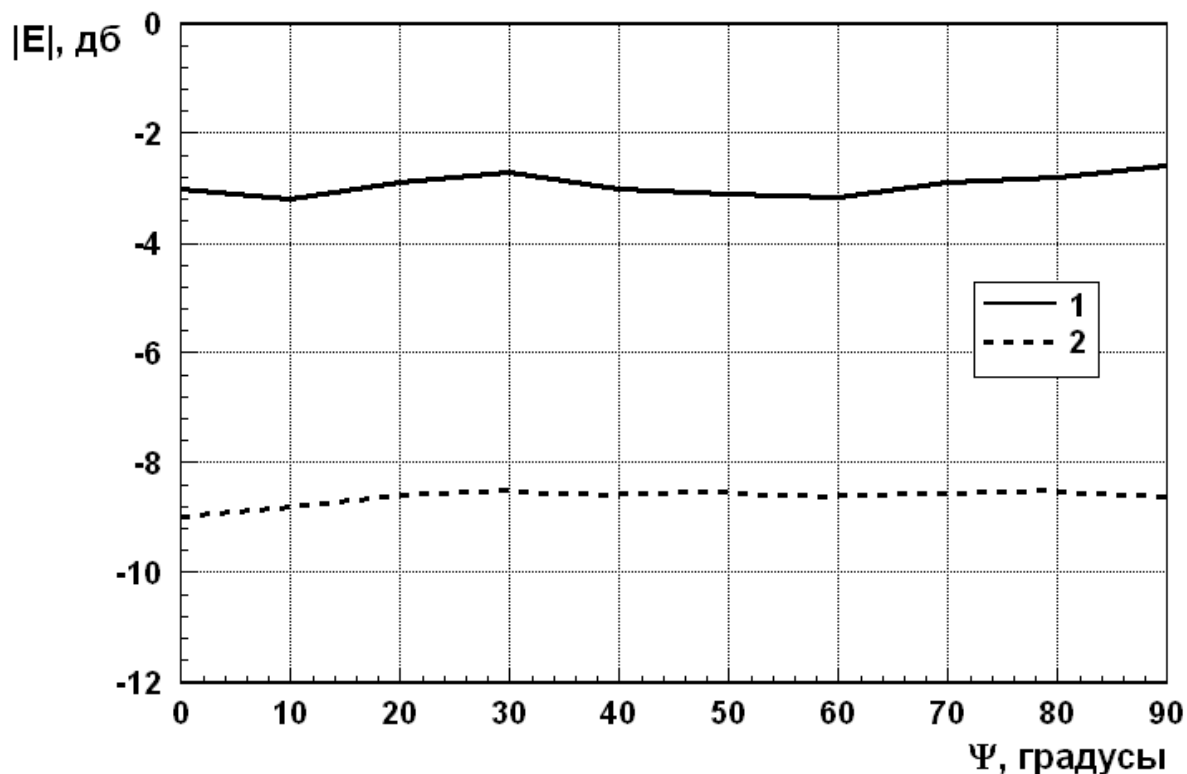


Рисунок 3 – Зависимость амплитуды рассеянной волны при моделировании элемента растительности в виде ромба для горизонтальной поляризации падающей волны: 1 – Релеевское рассеяние; 2 – Моделирование на основе метода моментов

Выводы. Проведено рассмотрение особенностей распространения электромагнитных волн по трассам связи в городских условиях. Показано влияние на затухание растительного покрова.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
2. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.



3. Donohue D.I., Kutter I.R. Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation. / D.I.Donohue, I.R.Kutter // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2000, vol. 42, №2, pp. 200 - 277.
4. Григорьев В.А. Адаптивные антенные решетки. Учебное пособие в 2-ух частях. Часть 2.: В.А. Григорьев, С.С. Щесняк, В.Л. Гулюшин, Ю.А. Распаев, И.А. Хворов, Щесняк А.С./ под общ. ред. В.А. Григорьева. - СПб: Университет ИТМО, 2016. - с. 118.
5. Шахгильдян В.В. Радиопередающие устройства. / Шахгильдян В.В., Козырев В.Б., Ляховкин А.А. // М: Радио и связь, 2003. - 560 с.
6. <http://www.stepunin.ru/OSS.rtf>
7. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
8. Львович И.Я. Применение методологического анализа в исследовании безопасности / И.Я.Львович, А.А.Воронов // Информация и безопасность. 2011. Т. 14. № 3. С. 469-470.
9. Кульнева Е.Ю. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств / Е.Ю.Кульнева, И.А.Гашенко // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 50.
10. Головинов С.О. Моделирование распространения миллиметровых волн в городской застройке на основе комбинированного алгоритма / С.О.Головинов, А.П.Преображенский, И.Я.Львович // Телекоммуникации. 2010. № 7. С. 20-23.
11. Исследование метода трассировки лучей для проектирования беспроводных систем связи / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский, С.О.Головинов // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. Т. 17. № 1. С. 32-35.
12. Максимова А. А. Методы исследования характеристик рассеяния электромагнитных волн объектами / А. А. Максимова, А. Г. Юрочкин // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 53-56.
13. Канавин С.В. Перспективы применения систем мобильного широкополосного доступа в сетях подвижной радиосвязи на основе стандартов mobile WIMAX и LTE / С.В.Канавин, А.С.Лукьянов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 79-82.
14. Мельникова Т.В. Перспективы применения систем мобильного широкополосного доступа в сетях подвижной радиосвязи на основе стандартов mobile WIMAX и LTE / Т.В.Мельникова // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 16. С. 61-63.
15. Часовской А. А. Оценка перспектив внедрения облачных вычислений на предприятиях и в государственном секторе на

- примере ФРГ / А. А. Часовской, Е. В. Алференко // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 94-97.
16. Лавлинская О. Ю. Технологии облачных вычислений и их применение в решении практических задач / О. Ю. Лавлинская, Т. М. Янкис // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2016. № 1. С. 33-36.
  17. <http://uz.denemetr.com/docs/294/index-20254-1.html>
  18. Пономарев Л.И. Моделирование радиотрасс мобильных систем связи. / Л.И. Пономарев, Т.Л. Манкевич. // Успехи современной радиоэлектроники, 1999, №8, с. 45-58.
  19. <http://systemseti.com/ССРО/408.html>
  20. <http://www.rit.informost.ru/rit/5-2005/45.pdf>
  21. Яковлев О.И. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов, А.Г. Павельев. - СПб. Ленанд, 2009. - 496 с.
  22. Ботов М. И. Введение в теорию радиолокационных систем : монография / М. И. Ботов, В. А. Вяхирев, В. В. Девогчак ; ред. М. И. Ботов. // Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. 394 с.
  23. Болучевская О.А. Свойства методов оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн / О.А.Болучевская, О.Н.Горбенко // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2013. № 3. С. 4.

D.G. Panarin, A.V.Danilova

## MODELING OF ELECTROMAGNETIC WAVES PROPAGATION IN THE COMMUNICATION CHANNEL WITH ATTENUATION

*Voronezh Institute of high technologies  
JSC Concern "Sozvezdie"*

*In this paper, the problems associated with the propagation of radio signals in wireless communication systems for rural and urban routes. The main causes of losses. The basic drawbacks of the approaches proposed Okamura and Hut. It is proposed to use model plane-environment to understand the implications of land cover on the track. Expressions are given for the coefficients of reflection and transmission. Used born of scattering of electromagnetic waves on the element of vegetation, the calculation of the scattered field was based on the method of moments solution of integral equations. A comparison of the wave amplitudes obtained on the basis of 2 methods – Rayleigh scattering and the method of moments.*

**Keywords:** wave propagation, telecommunication, method of moments, the disturbance attenuation.

## REFERENCES

1. Mishin Ya.A. O sistemakh avtomatizirovannogo proektirovaniya v besprovodnykh setyakh / Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2013. No.10. pp. 153-156.
2. Miloshenko O.V. Metody otsenki kharakteristik rasprostraneniya radiovoln v sistemakh podvizhnoy radiosvyazi / Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp.60-62.
3. Donohue D.I., Kutter I.R. Propagation modeling over terrain using the parabolic wave equation. / D.I.Donohue, I.R.Kutter // IEEE Trans. Antennas Propagat. 2000, vol. 42, No.2, pp. 200 - 277.
4. Grigor'ev V.A. Adaptivnye antennye reshetki. Uchebnoe posobie v 2-ukh chastyakh. Chast' 2.: V.A. Grigor'ev, S.S. Shchesnyak, V.L. Gulyushin, Yu.A. Raspaev, I.A. Khvorov, Shchesnyak A.S./ pod obshch. red. V.A. Grigor'eva. - SPb: Universitet ITMO, 2016. - pp.118.
5. Shakhgil'dyan V.V.Radioperedayushchie ustroystva. / Shakhgil'dyan V.V., Kozyrev V.B., Lyakhovkin A.A. // M: Radio i svyaz', 2003. - 560 p.
6. <http://www.stepunin.ru/OSS.rtf>
7. Golovinov S.O. Problemy upravleniya sistemami mobil'noy svyazi / S.O.Golovinov, A.A.Khromykh // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No. 9. pp.13-14.
8. L'vovich I.Ya. Primenenie metodologicheskogo analiza v issledovanii bezopasnosti / I.Ya.L'vovich, A.A.Voronov // Informatsiya i bezopasnost'. 2011. Vol. 14. No. 3. pp.469-470.
9. Kul'neva E.Yu. O kharakteristikakh, vliyayushchikh na modelirovanie radiotekhnicheskikh ustroystv / E.Yu.Kul'neva, I.A.Gashchenko // Sovremennye naukoemkie tekhnologii. 2014. No. 5-2. pp.50.
10. Golovinov S.O. Modelirovanie rasprostraneniya millimetrovykh voln v gorodskoy zastroyke na osnove kombinirovannogo algoritma / S.O.Golovinov, A.P.Preobrazhenskiy, I.Ya.L'vovich // Telekommunikatsii. 2010. No. 7. pp.20-23.
11. Issledovanie metoda trassirovki luchey dlya proektirovaniya besprovodnykh sistem svyazi / Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Preobrazhenskiy, S.O.Golovinov // Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. 2012. Vol. 17. No. 1. pp.32-35.
12. Maksimova A. A. Metody issledovaniya kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln ob"ektami / A. A. Maksimova, A. G. Yurochkin // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 16. pp.53-56.
13. Kanavin S.V. Perspektivy primeneniya sistem mobil'nogo shirokopolosnogo dostupa v setyakh podvizhnoy radiosvyazi na osnove standartov mobile WIMAX i LTE / S.V.Kanavin, A.S.Luk'yanov //

- Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 16. pp.79-82.
14. Mel'nikova T.V. Perspektivy primeneniya sistem mobil'nogo shirokopolosnogo dostupa v setyakh podvizhnoy radiosvyazi na osnove standartov mobile WIMAX i LTE / T.V.Mel'nikova // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 16. pp.61-63.
  15. Chasovskoy A. A. Otsenka perspektiv vnedreniya oblachnykh vychisleniy na predpriyatiyakh i v gosudarstvennom sektore na primere FRG / A. A. Chasovskoy, E. V. Alferenko // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp.94-97.
  16. Lavlinskaya O. Yu. Tekhnologii oblachnykh vychisleniy i ikh primeneniye v reshenii prakticheskikh zadach / O. Yu. Lavlinskaya, T. M. Yankis // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2016. No. 1. pp.33-36.
  17. <http://uz.denemetr.com/docs/294/index-20254-1.html>
  18. Ponomarev L.I. Modelirovaniye radiotrass mobil'nykh sistem svyazi. / L.I. Ponomarev, T.L. Mankevich. // Uspekhi sovremennoy radioelektroniki, 1999, No.8, p. 45-58.
  19. <http://systemseti.com/CCPO/408.html>
  20. <http://www.rit.informost.ru/rit/5-2005/45.pdf>
  21. Yakovlev O.I. Rasprostraneniye radiovoln / O.I. Yakovlev, V.P. Yakubov, V.P. Uryadov, A.G. Pavel"ev. - SPb. Lenand, 2009. - 496 p.
  22. Botov M. I. Vvedeniye v teoriyu radiolokatsionnykh sistem : monografiya / M. I. Botov, V. A. Vyakhirev, V. V. Devotchak ; red. M. I. Botov. // Krasnoyarsk : Sib. feder. un-t, 2012. 394 p.
  23. Boluchevskaya O.A. Svoystva metodov otsenki kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln / O.A.Boluchevskaya, O.N.Gorbenko // Modelirovaniye, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2013. No. 3. pp.4.