

УДК 621.396

Д.Г.Панарин, А.Г.Юрочкин  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ  
ДИФРАКЦИИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ**

*Воронежский институт высоких технологий  
Воронежский филиал Российской Академии государственной службы при  
Президенте Российской Федерации*

*В данной работе обсуждаются особенности процессов дифракции электромагнитных волн в высокочастотном диапазоне, поскольку он является перспективным с точки зрения дальнейшего развития систем связи. Отмечается, что с повышением частоты требуется рассматривать поверхности объектов, на которых происходит дифракция, как шероховатые. При численном моделировании вводится коэффициент шероховатости Френеля. Дано описание коэффициентов отражения с учетом шероховатости поверхности. Приведены рассчитанные коэффициенты отражения для различной поляризации падающей электромагнитной волны в зависимости от частоты. Рассмотрена зависимость коэффициента отражения в зависимости от угла падения при заданной частоте падающей электромагнитной волны.*

**Ключевые слова:** дифракция, электромагнитные волны, коэффициент отражения, коэффициент Френеля.

В настоящее время требования к характеристикам беспроводных сетей существенным образом растут. Современные системы связи позволяют решать практические задачи для промышленных, медицинских и научных служб, в большинстве случаев используется частота 2,4 ГГц [1-3]. При этом более высокие скорости передачи данных требуют, повышенной пропускной способности и, следовательно, более высокой несущей частоты.

Нелицензируемый частотный диапазон 60 ГГц, где скорость передачи данных будущих радиосистем будет достигать 3 Гбит/с, несомненно, является хорошей перспективой [4]. Для того, чтобы иметь еще большую скорость передачи данных, требуется дальнейшее повышение частоты.

В ближайшем будущем разработчики планируют активные разработки систем, которые будут работать со скоростями передачи данных от 10 Гбит/с и выше, на частотах выше 100 ГГц [5]. Такие системы могут функционировать в терагерцовом диапазоне и с точки зрения применения технологий прямых передач, в них будут входить всенаправленные диэлектрические зеркала.

Первые два частотных диапазона, которые могут быть использованы для таких систем, сосредоточены на частотах 300 и 350 ГГц, соответственно.

Для того, чтобы быть уверенным в хорошей работоспособности подобных систем, требуется осуществлять тщательное исследование характеристик каналов распространения информации в терагерцовом диапазоне.

Для этого используется специфическое моделирование, реализуемое на основе трассировки лучей для того, чтобы проводить оценку свойств пространственных каналов [6-8]. Их надежность зависит от точности определения характеристик распространения сигнала в моделируемой среде.

Для разрабатываемых коммуникационных систем в терагерцовом диапазоне необходимо использовать направленные антенны с высоким коэффициентом усиления, при этом требуется осуществлять точный прогноз по потерям на отражения в зеркальных направлениях, что будет иметь решающее значение для определения поведения характеристик каналов.

Потери при отражении и передаче данных для внутренних областей передающих структур были подробно охарактеризованы и смоделированы исследователями до частот не превышающих 60 ГГц [4]. Нижняя часть терагерцового диапазона находится от 300 ГГц до 1000 ГГц, что представляет интерес с точки зрения использования в этом диапазоне сверхширокополосных быстродействующих систем связи в будущем, к настоящему времени в этой области существует довольно небольшое число разработок.

В ряде публикаций получены определенные интересные результаты [9, 10]. Например, для бетона, гипса или обоев внутри помещений, в обычных низкочастотных случаях поверхность выглядит как плоская, но в СВЧ диапазоне, такие поверхности уже характеризуются наличием шероховатостей (миллиметровые и субмиллиметровые волны). Также эффектами многократных отражений нельзя пренебречь в случаях, когда рассматриваются слоистые среды. Типичными примерами многослойных поверхностей являются, например, краска на гипсе, а также окна, которые содержат одно или два стекла.

В общем случае, задачи, связанные с рассеянием электромагнитных волн шероховатыми поверхностями, могут быть решены на основе численного моделирования, базирующегося на методах интегральных или дифференциальных уравнений при решении основной краевой задачи Максвелла [11, 12].

Однако, численные подходы являются достаточно сложными и, как правило, трудоемкими. Вместо этого, при определенных условиях можно использовать аналитические приближения. Такие алгоритмы являются очень устойчивыми с точки зрения получаемых решений, позволяют

правильно с точки зрения физики сделать описание рассматриваемых проблем и могут быть легко реализованы при помощи лучевых подходов.

В настоящей работе мы рассмотрим применение метода, приведенного в [9] и который используется для оценки характеристик отражения гладких объектов при частотах выше 100 ГГц, для того промоделировать отражающие свойства шероховатого объекта в зеркальном направлении. При построении модели используется приближение Кирхгофа, которое уточнено для случая рассеяния от шероховатых поверхностей [13].

Это достигается за счет того, что в существующей модели происходит умножение на коэффициент отражения, который получен из уравнений Френеля с коэффициентом шероховатости Релея. Этот коэффициент может быть рассчитан на основе измеренной шероховатости поверхности исследуемого материала. Уточненная модель может быть проверена на основе измерения характеристик отражения для образца, представляющего собой штукатурку на шероховатом бетоне для диапазона частот от 0.1 до 1 ТГц.

Для того, чтобы учесть потери рассеяния в зеркальном направлении, коэффициенты отражения Френеля должны быть умножены на коэффициент шероховатости Рэлея [13]:

$$K_{\text{Релея}} = \exp\left(-\frac{Q}{2}\right), \quad (1)$$

где

$$Q = \left(\frac{4\pi\delta\cos\varphi_1}{\lambda}\right)^2. \quad (2)$$

Здесь  $\varphi_1$  - угол падения и отражения,  $\delta$  - стандартное отклонение, характеризующее шероховатую поверхность,  $\lambda$  - длина электромагнитной волны в свободном пространстве.

Уточненные коэффициенты отражения в модели, описывающей затухание сигнала, записываются следующим образом

$$R_{1TE} = K_{\text{Релея}}R_{TE}, R_{1TM} = K_{\text{Релея}}R_{TM}, \quad (3)$$

где  $R_{TE}$  и  $R_{TM}$  представляют собой коэффициенты отражения Френеля для гладкой поверхности в случае TE и TM поляризованных волн, соответственно. Тогда в терагерцовом диапазоне при индексе рефракции  $n$  и коэффициенте поглощения  $\beta$  [9]

$$R_{TE} = \frac{Z\cos\varphi_1 - Z_0\cos\varphi_2}{Z\cos\varphi_1 + Z_0\cos\varphi_2}, R_{TM} = \frac{Z\cos\varphi_2 - Z_0\cos\varphi_1}{Z\cos\varphi_2 + Z_0\cos\varphi_1}, \quad (4)$$

где  $\varphi_2 = \arcsin(\sin(\varphi_1)Z/Z_0)$  является углом рефракции,  $Z_0$  – импеданс свободного пространства,  $Z$  – волновой импеданс материала, отражающего электромагнитные волны. Его можно определить на основе следующего выражения

$$Z = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0(n^2 - (\frac{c\beta}{4\pi f})^2 - j\frac{cn\beta}{2f\pi})}} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  и  $\mu_0$  – являются диэлектрической и магнитной проницаемостью свободного пространства,  $c$  – скорость света,  $f$  – частота электромагнитной волны.

Если вклад отражения от поверхности превышает общий коэффициент отражения по исследуемой структуре, то в этом случае достаточно использовать обычные уравнения Френеля [9], для того, чтобы корректным образом сделать описание процессов отражения электромагнитных волн.

Это будет наблюдаться в том случае, если толщина препятствия велика по сравнению с длиной волны и материал поглощает электромагнитные волны значительным образом, так, что волны, отраженные от внутренней поверхности материала практически затухают, когда они достигают поверхности объекта.

Однако, если рассматриваются оптически тонкие материалы или слоистые структуры, то при расчетах необходимо учитывать многократные отражения.

Частотные и угловые зависимости коэффициента отражения могут значительным образом иметь отличия, чем для случаев, когда рассматриваются оптически толстые материалы, вследствие того, что интерференция отраженных волн может приводить как к усилению, так и к затуханию сигнала.

Явление внутреннего отражения рассматривалось и изучалось в литературе для моделирования распространения электромагнитных волн на сверхвысоких частотах и в полосе 60 ГГц. В настоящей работе анализируются эффекты отражения для частот, которые превышают 100 ГГц.

На Рисунке 1 приведены рассчитанные коэффициенты отражения  $R_{TE}$  и  $R_{TM}$  в зависимости от частоты падающей электромагнитной волны. На графике кривая 1 относится к  $R_{TE}$ , кривая 2 относится к  $R_{TM}$ . Рассматривался случай падения электромагнитной волны под углом  $10^\circ$  на бетон. На Рисунке 2 дан расчет коэффициента отражения  $R_{TE}$  в

зависимости от угла падения при частоте падающей электромагнитной волны  $f=800$  ГГц.

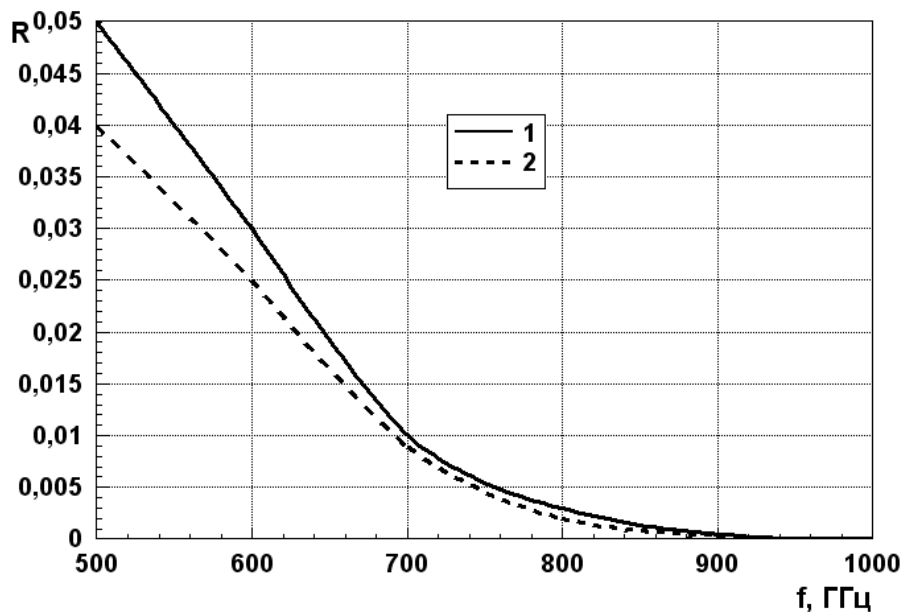


Рисунок 1 – Рассчитанные коэффициенты отражения  $R_{TE}$  и  $R_{TM}$  в зависимости от частоты падающей электромагнитной волны

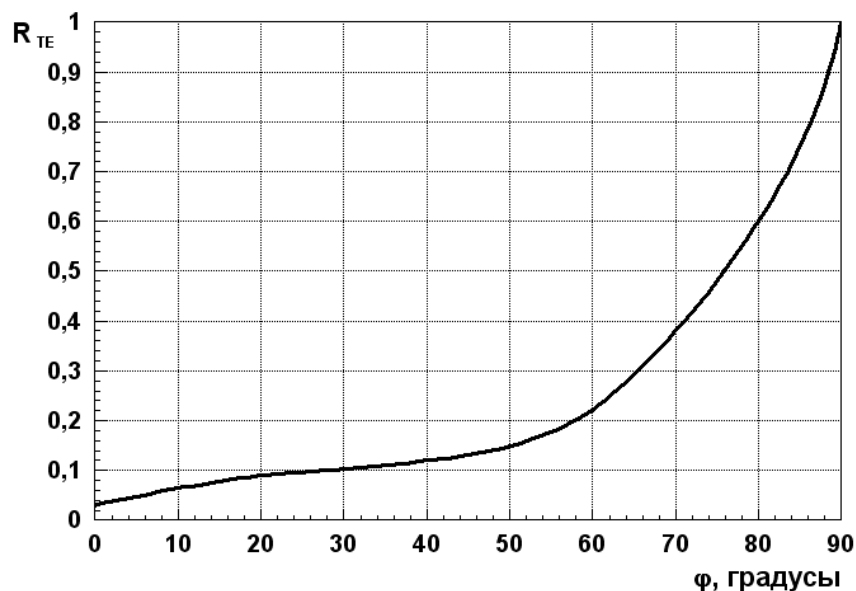


Рисунок 2 – Рассчитанный коэффициент отражения  $R_{TE}$  в зависимости от угла падения электромагнитной волны

Представляет интерес использовать методики, позволяющие ускорить вычисления характеристик рассеяния электромагнитных волн [14-20].

Выводы. Рассмотрены отражающие свойства материалов для терагерцового диапазона в рамках соответствующей математической

модели. Результаты интересны с точки зрения перспектив использования данного диапазона при разработке систем связи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баранов А.В. Проблемы функционирования mesh-сетей / А.В.Баранов // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 49-50.
2. Казаков Е.Н. Разработка и программная реализации алгоритма оценки уровня сигнала в сети wi-fi / Е.Н.Казаков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1(12). С. 13.
3. Головинов С.О. Проблемы управления системами мобильной связи / С.О.Головинов, А.А.Хромых // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 13-14.
4. <http://www.osp.ru/cw/2013/14/13035883/>
5. Исаев В.М. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона / В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов // Доклады ТУСУРа, № 4 (34), декабрь 2014, с. 5-21.
6. Львович Я.Е. Исследование метода трассировки лучей при проектировании беспроводных систем связи / Я.Е.Львович, И.Я.Львович, А.П.Преображенский, С.О.Головинов // Информационные технологии. 2011. № 8. С. 40-42.
7. 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.
8. Львович Я.Е. 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.
9. Piesiewicz R. Terehertz characterization of building materials / R. Piesiewicz, C. Jansen, D. Mittleman, T. Kleine-Ostmann, M. Koch, T. Kurner // Electronics Letters, 2005, Vol.41, №18, pp.1002-1004.
10. Леонтьев В.В. Рассеяние электромагнитных волн шероховатой поверхностью в зеркальном направлении при скользющем облучении / В.В.Леонтьев, М.А.Бородин, Л.И.Богин // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2007, Том. 2, с.3-13.
11. 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.

12. Щербатых С.С. Метод интегральных уравнений как основной способ анализа в САПР антенн / С.С.Щербатых // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 1(12). С. 10.
13. Залипаев В.В. Строгие и приближенные методы моделирования рассеяния волн на локализованном возмущении идеально проводящей поверхности / В.В.Залипаев, А.В.Костин // Журнал технической физики, 2000, № 1, с.3-9.
14. 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. № 16. С. 33-36.
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. № 16. С. 94-97.
16. Lvovich I. The development of cad of information systems and software for diffractive structures / I. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - № 1. - С. 107-116.
17. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya. Lvovich, A. Preobrazhensky, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - № 1. - С. 117-125.
18. Преображенский А.П. Моделирование рассеяния волн на поллой структуре с поглощающим материалом / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 8.1 (68). - С. 523-526.
19. Преображенский А.П. Моделирование рассеяния электромагнитных волн на несимметричном объекте / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 8.1 (68). - С. 526-531.
20. Преображенский А.П. Исследование характеристик рассеяния электромагнитных волн для поллой структуры в объекте / А.П. Преображенский, О.Н. Чопоров, К.В. Кайдакова // В мире научных открытий. - 2015. - № 4.1 (64). - С. 548-553.

V.G. Panarin, A.G.Yurochkin  
**THE RESEARCH OF FEATURES OF DIFFRACTION  
PROCESSES IN THE HIGH FREQUENCY RANGE**

*Voronezh Institute of High Technologies  
Voronezh branch of the Russian Academy of state service under the  
President of the Russian Federation*

*This paper discusses the features of processes of diffraction of electromagnetic waves in the high frequency range as it is promising from the point of view of further development of communication systems. It is noted that with the increase in frequency is required to consider the objects surface on which the diffraction as rough. The numerical simulation is introduced the Fresnel's coefficient of roughness. This description of the reflection coefficients taking into account the surface roughness. Given the calculated reflection coefficients for different polarizations of the incident electromagnetic wave depending on frequency. The dependence of the reflection coefficient depending on angle of incidence for a given frequency of the incident electromagnetic wave.*

**Keywords:** diffraction, electromagnetic waves, reflection coefficient, Fresnel's coefficient.

**REFERENCES**

1. Baranov A.V. Problemy funktsionirovaniya mesh-setey / A.V.Baranov // Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologiy. 2012. No.9. pp. 49-50.
2. Kazakov E.N. Razrabotka i programmaya realizatsii algoritma otsenki urovnya signala v seti wi-fi / E.N.Kazakov // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No.1(12). pp. 13.
3. 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.
4. <http://www.osp.ru/cw/2013/14/13035883/>
5. Isaev V.M. Sovremennye radioelektronnye sistemy teragertsovogo diapazona / V.M. Isaev, I.N. Kabanov, V.V. Komarov, V.P. Meshchanov // Doklady TUSURa, No.4 (34), dekabr' 2014, pp. 5-21.
6. L'vovich Ya.E. Issledovanie metoda trassirovki luchey pri proektirovanii besprovodnykh sistem svyazi / Ya.E.L'vovich, I.Ya.L'vovich, A.P.Ppeobpazhenskiy, S.O.Golovinov // Informatsionnye tekhnologii. 2011. No.8. pp. 40-42.
7. 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.
8. L'vovich Ya.E. 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.
9. Piesiewicz R. Terehertz characterization of building materials / R. Piesiewicz, C. Jansen, D. Mittleman, T. Kleine-Ostmann, M. Koch, T. Kurner // Electronics Letters, 2005, Vol.41, No.18, pp.1002-1004.
  10. Leont'ev V.V. Rasseyaniye elektromagnitnykh voln sherokhovatoy poverkhnost'yu v zerkal'nom napravlenii pri skol'zyashchem obluchenii / V.V.Leont'ev, M.A.Borodin, L.I.Bogin // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika, 2007, Vol.2, pp. 3-13.
  11. 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.
  12. Shcherbatykh S.S. Metod integral'nykh uravneniy kak osnovnoy sposob analiza v SAPR antenn / S.S.Shcherbatykh // Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii. 2016. No.1(12). pp. 10.
  13. Zalipaev V.V. Strogie i priblizhennyye metody modelirovaniya rasseyaniya voln na lokalizovannom vozmushchenii ideal'no provodyashchey poverkhnosti / V.V.Zalipaev, A.V.Kostin // Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2000, No.1, s.3-9.
  14. 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.16. pp. 33-36.
  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.16. pp. 94-97.
  16. Lvovich I. The development of cad of information systems and software for diffractive structures / I. Lvovich, A. Preobrazhenskiy, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - No.1. - pp. 107-116.
  17. Lvovich Ya. Modeling of scattering of electromagnetic waves on the base of multialternative optimization / Ya. Lvovich, A. Preobrazhenskiy, O. Choporov // Information Technology Applications. - 2016. - No.1. - pp. 117-125.
  18. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie rasseyaniya voln na poloy strukture s pogloshchayushchim materialom / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.8.1 (68). - pp. 523-526.
  19. Preobrazhenskiy A.P. Modelirovanie rasseyaniya elektromagnitnykh voln na nesimmetrichnom ob"ekte / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V.

Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.8.1 (68). - pp. 526-531.

20. Preobrazhenskiy A.P. Issledovanie kharakteristik rasseyaniya elektromagnitnykh voln dlya poloy struktury v ob"ekte / A.P. Preobrazhenskiy, O.N. Choporov, K.V. Kaydakova // V mire nauchnykh otkrytiy. - 2015. - No.4.1 (64). - pp. 548-553.