

Рис. 4. Спектр сигнала, полученный в лиственном лесу

Результаты радиопросвечивания лиственного леса плотностью 0,11 м, отличительной особенностью которого являлось отсутствие кустарника и молодых деревьев, как в первом из рассмотренных хвойных лесов представлены на рис. 4. При этом, однако, деревья имели значительно большую толщину стволов. По-видимому, эта структурная особенность и определила характер изменения спектрограммы, выражающийся в существенном ослаблении низко- и среднечастотных составляющих сигнала. Понижение амплитуды последних, особенно очевидно из сравнения рис. 1 и 4, может быть объяснено большей плотностью растительности, а практически полное прохождение через лес высокочастотных гармоник – отсутствием мелких элементов растительности на линии связи антенн.

Таким образом, описанные результаты экспериментов демонстрируют существенные различия в изменении спектров импульсных сигналов при распространении в различных типах лесной растительности. Этот факт, на наш взгляд, может быть использован для разработки методов радиопросвечивания лесных покровов для выявления их внутренней структуры.

Библиографические ссылки

1. Результаты исследований солнечного ветра и ионосфер планет радиофизическими методами / Н. А. Арманд,

Ю. В. А. Л. Гуляев, Гаврик и др. // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180, № 5. С. 34–40.

2. *Ground Penetrating Radar: Theory And Applications* / Edited by Harry M. Elsevier, Amsterdam, 2009.

3. Бордонский Г. С. Диэлектрические потери пресного льда на СВЧ // *Радиотехника и электроника*. 1995. № 11. С. 1620–1625.

4. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS / В. Б. Кашкин, В. И. Кокорин, В. Л. Миронов, С. В. Сизасов // *Радиотехника и электроника*. 2006. Т. 51, № 7. С. 825–830.

References

1. Armand N. A., Gulyaev Yu. V., Gavrik A. L. and other. *Uspekhi fizicheskikh nauk*. 2010. Vol. 180, № 5, pp. 34–40.

2. *Ground Penetrating Radar: Theory And Applications*. Edited by Harry M. Elsevier, Amsterdam, 2009.

3. Bordonkiy G. S. *Radiotekhnika i elektronika*. 1995, № 11, pp. 1620–1625.

4. Kashkin V. B., Kokorin V. I., Mironov V. L., Sizasov S. V. *Radiotekhnika i elektronika*. 2006. Vol. 51, № 7, pp. 825–830.

© Ветлужский А. Ю., Калашников В. П., 2013

УДК 621.396.96.01

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕНОСА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ VHF–UHF-ДИАПАЗОНОВ В ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6. E-mail: kalashnikovp@yandex.ru

Исследуются особенности распространения излучения VHF–UHF-диапазонов в лесах различного видового и структурного состава при малых пространственных разностях антенн. Показано, что существование боковой волны, распространяющейся над верхней кромкой растительности, может быть установлено из анализа дистанционных зависимостей уровня поля в лесной среде.

Ключевые слова: распространение радиоволн, боковая волна.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 12-02-98010.

STUDY OF THE MECHANISMS OF TRANSFER OF VHF–UHF BAND RADIO EMISSION IN THE FOREST VEGETATION

A. Yu. Vetluzhsky, V. P. Kalashnikov

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: kalashnikovp@yandex.ru

Features of propagation of radiation of VHF, UHF bands in the forests of different species and structural compositions are investigated at small spread in space of aerials. It is shown that the existence of a lateral wave propagating over the upper edge of the vegetation can be revealed from the analysis of remote dependence of the electromagnetic field level in the forest environment.

Keywords: propagation of radio waves, the lateral wave.

Актуальность исследования влияния лесных покровов на распространение радиоволн в последние несколько десятилетий связана с развитием алгоритмов интерпретации данных дистанционного зондирования и применением, преимущественно в силовых структурах, наземных средств связи, работающих на небольших дистанциях в растительности, например, при ведении боевых действий. Лесной покров является многокомпонентной неоднородной средой, которая не оказывает существенного влияния на распространение электромагнитных волн, длина которых много больше характерных размеров объектов растительности. Однако, при прохождении УКВ через лес это влияние оказывается существенным, при этом преобладают преимущественно два основных механизма переноса излучения [1–3]. Первый связан с непосредственным прохождением радиоволн через толщу леса, при этом они рассеиваются и поглощаются растительностью. Данный механизм имеет существенное значение только при небольших пространственных разностях антенн, так как при этом мощность излучения быстро убывает. Второй связан с формированием боковых волн, распространяющихся над верхней кромкой леса и практически не ослабляющихся из-за влияния растительности, за счет чего на больших дистанциях такой способ распространения сигнала в присутствии лесного покрова является преобладающим. Говоря о втором механизме, следует отметить, что до сих пор остаются мало изученными вопросы о полосе частот, в которой возможно возникновение боковых волн, а также о минимальных дистанциях, т. е. расстояниях между корреспондирующими антеннами, на которых уровень ослабления боковой волны становится меньше ослабления излучения, непосредственно распространяющегося сквозь толщу лесной растительности. Эти вопросы, на наш взгляд, являются принципиальными, поскольку смена механизмов распространения влечет за собой изменение дистанционного поведения поля в лесной среде: экспоненциальный закон затухания, обусловленный эффектами поглощения и рассеяния элементами растительности и характерный для волн прямого прохождения, должен сменяться обратно пропорциональной квадрату расстояния зависимостью, типичной для боковых волн.

Целью настоящей работы является представление и анализ экспериментальных данных по радиопросвечиванию

леса различного видового и структурного состава волнами метрового и дециметрового диапазонов, при малых пространственных разностях антенн.

В качестве объектов исследования были выбраны несколько типов лесной растительности, значительно отличающейся по видовому и структурному составу. Лес первого типа был хвойным – сосновым. Основной особенностью являлось отсутствие, как подлеска, так и низкорасположенных ветвей, а также вертикальная ориентация стволов относительно земли. Измерения проводились в двух лесных массивах такого типа с существенно отличающейся плотностью произрастания деревьев. В первом случае она в среднем составила $0,14 \text{ м}^{-2}$, при этом высота и толщина стволов были равны 17 и 0,27 м соответственно. Во втором – лес был более редким, с плотностью $0,07 \text{ м}^{-2}$, высотой порядка 14 м и диаметром стволов 0,21 м.

Также исследовалось влияние на распространение излучения смешанного леса, состоящего из березы, кедра, сосны и лиственницы со следующими параметрами: плотность древостоя $0,21 \text{ м}^{-2}$, высота деревьев 16 м, диаметр стволов деревьев 0,25 м. Имелся редкий кустарник различных пород высотой около 2 м.

Для радиопросвечивания растительности использовалось следующее оборудование: передатчики – генераторы Г4-129, РН12Б; приемная и передающая антенны – полуволновые симметричные вибраторы; приемник – анализатор спектра ИТ-08.

Измерения проводились на частотах 150 и 600 МГц при вертикальной поляризации излучения. Выбор частот был обусловлен тем, что на нижней частоте длина волны оказывалась близкой к среднему расстоянию между деревьями, а на верхней была значительно меньше. Как приемная, так и передающая антенны устанавливались внутри лесной среды на высоте 2 м от земли.

Для достижения достаточной статистической обеспеченности на каждой дистанционной отметке уровень сигнала фиксировался в семи точках, располагавшихся в пределах примерно равного длине волны участка поперек основной трассы распространения излучения. Таким образом, снижалось влияние на получаемые результаты местоположения приемной антенны относительно ближайших деревьев. В итоге полученные значения уровня поля усреднялись.

Результаты измерений, полученные в более густом из сосновых лесов на частоте 150 МГц представлены на рис. 1. Как на этом, так и на последующих рисунках, данные нормированы к нулевому уровню на дистанции 10 м. Из анализа графика следует, что характер дистанционной зависимости поля меняется при расстоянии между антеннами 95–100 м. Здесь же приведены результаты аппроксимации двух участков полученной кривой функциями $\exp(-\alpha R)/R^2$ и β/R^4 , изображенных на графике в полулогарифмическом масштабе штрихпунктирной и штриховой линиями соответственно. В функциях α и β – некоторые постоянные коэффициенты. Знаменатели экспоненциальной

и степенной функций обусловлены соответственно ослаблением мощности сигнала из-за расходимости фронта волны и дифракционного характера распространения боковой волны в растительности.

Измерения, выполненные в редком сосновом лесу на частоте 150 МГц, изображены на рис. 2. Результаты измерений, полученных в смешанном лесу, на частоте 600 МГц показаны на рис. 3. В отличие от результатов, показанных на рис. 1, поведение последних двух зависимостей на всей дистанции проведения измерений не менялось и, как следует из графиков, хорошо аппроксимировалось экспоненциальной функцией.

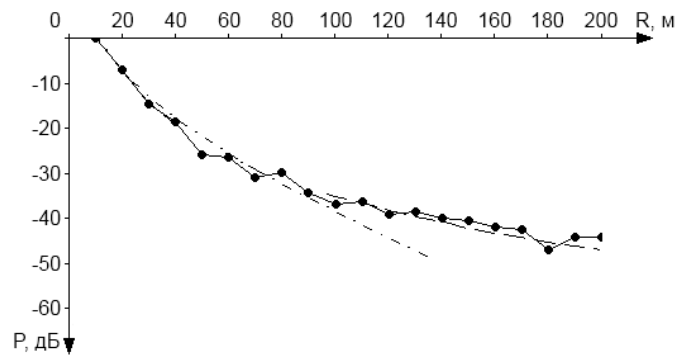


Рис. 1. Дистанционная зависимость уровня поля, полученная в частом сосновом лесу, частота 150 МГц

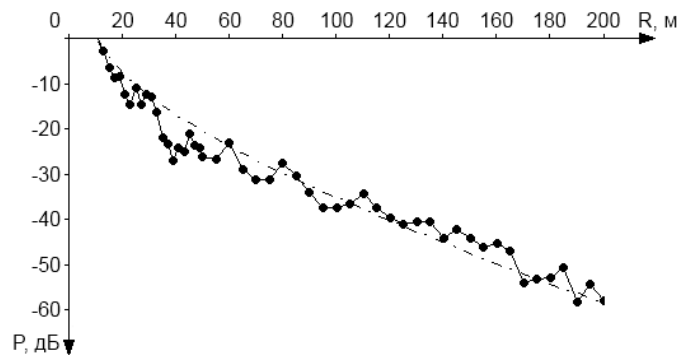


Рис. 2. Дистанционная зависимость уровня поля, полученная в редком сосновом лесу, частота 150 МГц

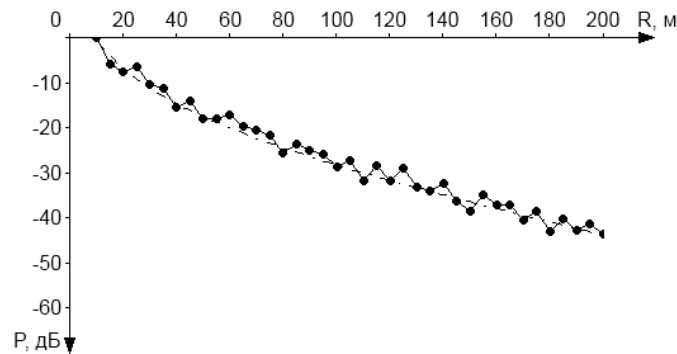


Рис. 3. Дистанционная зависимость уровня поля, полученная в смешанном лесу, частота 600 МГц

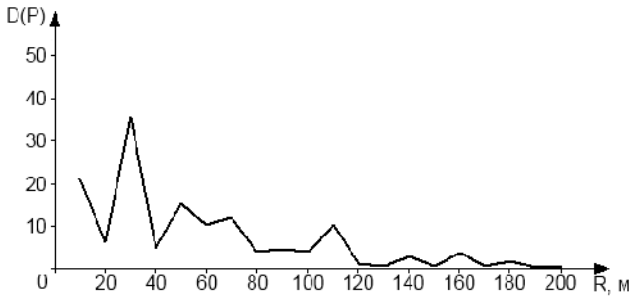


Рис. 4. Дисперсионная зависимость поля для частого соснового леса

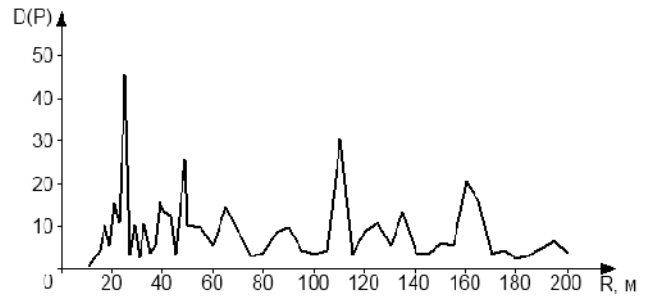


Рис. 5. Дисперсионная зависимость поля для редкого соснового леса

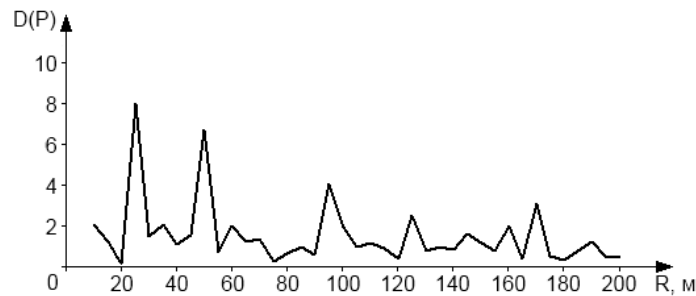


Рис. 6. Дисперсионная зависимость поля для смешанного леса

Из анализа полученных данных, на наш взгляд, можно сделать ряд выводов о взаимодействии излучения с лесной растительностью. Во-первых, из анализа результатов на рис. 1 следует вывод о проявлении боковой волны в частом сосновом лесу на дистанции порядка 100 м. На это указывает сам факт изменения поведения дистанционных зависимостей на этом расстоянии, предполагающий смену механизмов распространения волн, а также вид функции, которой аппроксимирован второй участок полученной кривой. Отметим, что в большинстве работ, касающихся вопросов распространения боковых волн в лесу, даются значительно большие оценки подобных дистанций. Следует подчеркнуть, что речь идет именно об их проявлении, а не формировании, т. е. о дистанциях, на которых их ослабление становится сравнимо с ослаблением прямых волн.

Во-вторых, зависимости, изображенные на рис. 2 и 3, не меняют своего поведения на всей протяженности исследованных участков леса. Это означает, что механизм рассеяния и поглощения прямых волн, определяющий поведение начального участка зависимости на рис. 1, здесь является основным и, по-видимому, единственным на всей протяженности трассы. Отсутствие боковых волн в таких лесах обусловлено тем, что среднее расстояние между деревьями значительно превышает длину волны, т. е. лесную среду нельзя считать сплошной слоистой структурой и излучение быстро затухает из-за рассеяния на стволах деревьев. Таким образом, только при определенных соотношениях среднего расстояния между деревьями и длины волны возможно возникновение боковых волн.

Подтверждением вышеописанных предположений является статистический анализ эксперимен-

тальных данных. Так на рис. 4–6 представлены зависимости дисперсии уровня поля $D(P) = \langle P^2 \rangle - \langle P \rangle^2$, где символ $\langle \rangle$ означает усреднение по 7 измерениям.

График на рис. 4 демонстрирует уменьшение флуктуаций уровня поля, начиная с дистанций порядка 100–110 м, что объясняется преимущественно однолучевым распространением излучения на дальние расстояния, т. е. посредством боковой волны. С другой стороны, многолучевой характер распространения, наблюдающийся при непосредственном прохождении излучения сквозь растительность, обуславливает значительные уровни дисперсии вследствие интерференции волн, отраженных преимущественно от деревьев, на протяжении всей трассы проведения измерений, что и демонстрируют графики на рис. 5 и 6. Следует отметить, что уменьшение дисперсии по абсолютному уровню в густом смешанном лесу (рис. 6), относительно дисперсии в хвойном, объясняется увеличением количества интерферирующих волн, вследствие чего общий уровень флуктуаций уровня поля уменьшается.

Таким образом, проявление боковой волны, распространяющейся над верхней кромкой леса и испытывающей меньшее ослабление по сравнению с прямой волной, проходящей через лес, возможно, когда среднее расстояние между деревьями существенно не превышает длину волны, т. е. в ситуации, когда лесную среду можно считать сплошной слоистой структурой. Существование боковой волны может быть установлено из анализа дистанционных зависимостей и флуктуационных характеристик уровня поля в лесной среде.

Библиографические ссылки

1. Tamir T. Radio waves propagation along mixed paths in forest environments // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 1977. Vol. 25. P. 471–477.
2. Analysis of radio wave propagation in a four-layered anisotropic forest environment / L. W. Li, J. H. Koh, T. S. Yeo et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1999. Vol. 37. P. 1967–1979.
3. Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands // IEEE Trans. Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. P. 1461–1468.

References

1. Tamir T. Radio waves propagation along mixed paths in forest environments. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 25, Jul. 1977, pp. 471–477.
2. Li L. W., Koh J. H., Yeo T. S., Leong M. S., Kooi P. S. Analysis of radio wave propagation in a four-layered anisotropic forest environment. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, Vol. 37, Jul. 1999, pp. 1967–1979.
3. Meng Y. S., Lee Y. H., Ng B. C. Empirical near ground path loss modeling in a forest at VHF and UHF bands. IEEE Trans. Antennas and Propagation, Vol. 57, May 2009, pp. 1461–1468.

© Ветлужский А. Ю., Калашников В. П., 2013

УДК 550.837

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЛЕСНОЙ СРЕДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДАРА «ОКО-2»

В. Б. Хаптанов, Ю. Б. Башкуев, М. Г. Дембелов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, Улан-Удэ, ул. М. Сахьяновой, 6. E-mail: valery433210@rambler.ru

Рассмотрены результаты исследования характеристик лесной среды с использованием георадара «Око-2». Предложена методика оперативного дистанционного определения плотности лесного массива на основе георадарной технологии с погрешностью 5 %.

Ключевые слова: георадар, плотность лесной среды.

DETERMINATION OF THE FOREST ENVIRONMENT DENSITY WITH THE USE OF GPR “EYE-2”

V. B. Khaptanov, Yu. B. Bashkuev, M. G. Dembelov

Institute of Physical Materials Science of the Siberian Branch Russian Academy of Sciences
6 Sakhyanova st., Ulan-Ude, Russia. E-mail: valery433210@rambler.ru

In the report the author present results of studies of the forest environment characteristics with the use of GPR “Eye-2”. The technique of operational remote determination of the forest environment density, based on GPR technology with accuracy of 5 %, is proposed.

Keywords: GPR, forest environment density.

Известно, что на территории России леса покрывают площадь свыше 7 млн км², из них в Предбайкалье и Забайкалье – 960 тыс. км² (60 % территории). Главную роль в Сибири играют хвойные леса – сосна, лиственница, ель, кедр. Из лиственных пород наиболее широко распространены береза и осина. Сосновые леса, преобладающие в регионе, обычно растут на сухих песчаных грунтах и южных склонах гор. Высота деревьев изменяется от 5 до 30 м, в среднем 10–20 м; диаметр ствола – от 0,1 до 0,8 м, в среднем 0,15–0,35 м. На открытых местах высота деревьев ниже, чем в густом лесу. Для прогнозирования распространения радиоволн вдоль земной поверхности, покрытой лесом, необходимо знать как

электрические параметры лесной растительности ($\sigma_{\text{л}}$ и $\varepsilon_{\text{л}}$), так и плотность (густоту) лесной среды. В литературе имеется ограниченное количество экспериментальных данных [1], полученных в различных физико-географических условиях (субтропики, европейская часть России, Северная Америка). Существует определенная связь между типом деревьев и геоэлектрическим разрезом подстилающей среды. Например, для песчаных грунтов, на которых растут сосновые леса, характерны геоэлектрические разрезы типа $\sigma_1 < \sigma_2$, где $\sigma_1 = 0,4\text{--}3,3$; $\sigma_2 = 3,7\text{--}24$ мСм/м; $h_1 = 5\text{--}38$ м. Горные породы хребтов, покрытых лесом, имеют обычно геоэлектрический разрез типа $\sigma_1 > \sigma_2$, где $\sigma_1 \leq 1\text{--}3$ мСм/м.