

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЛЕСНЫХ ПОКРОВОВ

Б.В. Басанов, А.Ю. Ветлужский

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН, г. Улан-Удэ

E-mail: vay@pres.bscnet.ru

Экспериментально исследованы условия формирования боковых волн, скользящих вдоль верхней кромки лесного покрова. Предложен метод определения электрофизических параметров лесной среды, основывающийся на их взаимосвязи с траекторией распространения боковой волны.

В последние десятилетия интерес к исследованию распространения электромагнитных волн в лесных покровах традиционно остается велик. Особую актуальность такие исследования приобрели с развитием методов дистанционного зондирования земной поверхности. Это связано с существенным влиянием лесной растительности на параметры электромагнитных излучений практически любых диапазонов, определяющим, во многих случаях, особенности распространения волн вблизи земной поверхности. При изучении электродинамических характеристик лесной растительности интерес представляет рассмотрение следующих вопросов. Во-первых, это определение ослабляющих и рассеивающих свойств растительности, особенно важное применительно к задачам дистанционного зондирования, и разработка способов учета ее влияния на характеристики сигналов путем построения моделей леса как случайно-неоднородной гетерогенной среды [1]. Во-вторых, это создание эффективных методов определения электрофизических параметров лесных покровов, необходимых при описании лесной среды как слоистой структуры. В обоих случаях экспериментальные исследования распространения радиоволн в лесах различного типа с учетом их биоморфологических параметров играют большую роль.

Целью настоящей работы является разработка метода определения эффективной диэлектрической проницаемости лесной растительности на основе прямых измерений ослабления радиоволн VHF диапазона. Говоря о прохождении волн этого диапазона через лесные массивы, можно вести речь о нескольких основных механизмах распространения. Во-первых, это – рассеяние и поглощение при непосредственном прохождении волн через лесной покров. Так как при этом уровень излучения быстро убывает, данный способ распространения имеет существенное значение только на небольших дистанциях. Второй механизм 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 основным. Иногда вводятся в рассмотрение также волны, отраженные от верхней кромки леса. Однако такими волнами в силу их малой амплитуды и быстрого затухания в рассматриваемом диапазоне частот можно пренебречь.

Экспериментальные исследования проводились в летнее время в лесном массиве, расположенном у южной оконечности озера Байкал. Участок леса, в пределах которого производились измерения, располагался на ровной поверхности и состоял из лиственных (береза, ольха) – составлявших примерно 75% общего количества – и хвойных (преимущественно кедр) пород деревьев. Структурной особенностью растительности являлось большое количество низко расположенных ветвей. Подлесок практически отсутствовал. Средняя высота древостоя составила 11 м, средний диаметр стволов 25-30 см.

Антенны погружались в лесную среду и располагались на высоте 2 м над поверхностью земли. Измерения проводились на частоте 150 МГц. Передающая антенна представляла собой несимметричный четвертьволновый вибратор, приемная – полуволновый симметричный вибратор. Выходная мощность генератора составляла 1,5 Вт. Определялись дистанционные зависимости уровня поля в исследуемом лесу в интервале расстояний между антеннами от 3 до 180 м. Усредненные по 25 реализациям результаты измерений на двух участках с разной плотностью древостоя ($0,24 \text{ м}^2$ и $0,16 \text{ м}^2$) представлены сплошными кривыми на рис. 1 и 2 соответственно. Точками обозначены максимальные и минимальные полученные значения уровней поля.

На представленных графиках можно выделить три характерных участка:

первый – интенсивного спада поля – соответствует распространению волн в лесу в пределах прямой видимости, когда уровень первичного поля превышает интенсивность рассеянных элементами

растительности (в данном частотном диапазоне – в основном стволами и крупными низко расположенными ветвями) компонент;

второй, более пологий участок описывает процесс убывания амплитуды поля из-за рассеяния и поглощения и характерен для дистанций, на которых рассеянная компонента поля является преобладающей;

третий, характеризующийся наименьшим погонным ослаблением поля, связан с появлением боковой волны, распространяющейся над верхним пологом леса, которая и определяет дальнейший ход дистанционных зависимостей.

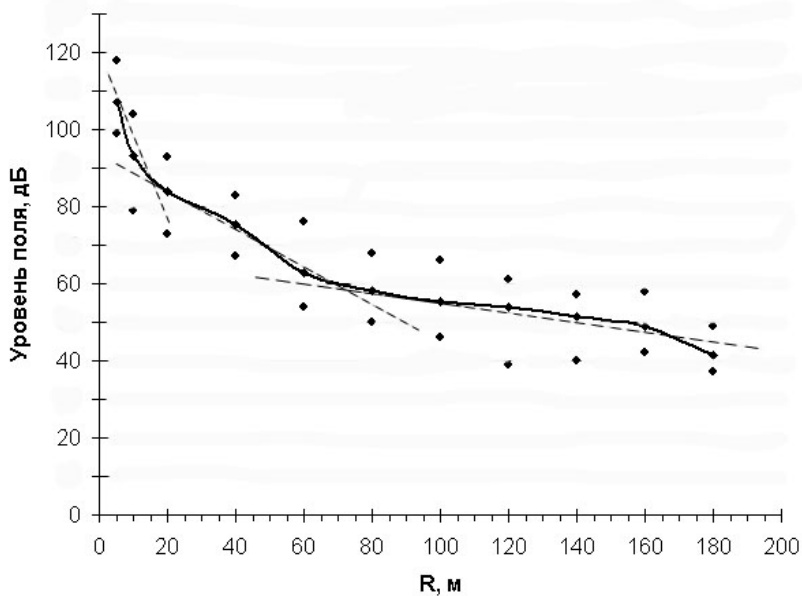


Рис. 1

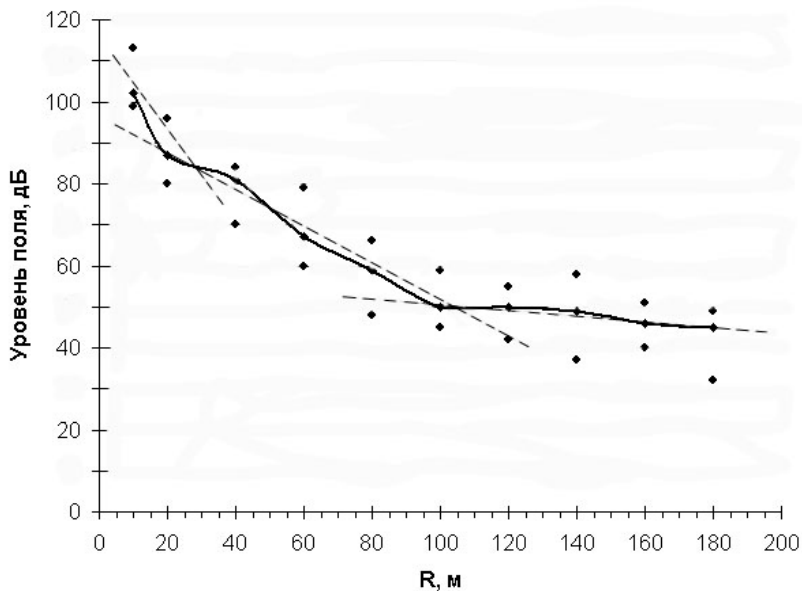


Рис. 2

Расстояния, на которых происходила смена указанных механизмов распространения волн в лесной среде, определялись путем построения линий тренда так, как это выполнено на рис. 1 и 2. Отсюда следует, что расстояния между антеннами, на которых проявляются перечисленные выше механизмы распространения, зависят от плотности леса. В частности, формирование боковой волны в более гус-

том из исследовавшихся участков леса начинало происходить на отметке 70-80 м, а в более редком – на дистанциях 100-110 м, как это и следует из общей теории распространения волн в слоистых средах.

На наш взгляд, важным результатом проведенных исследований является то, что во всех рассмотренных случаях боковая волна обнаруживалась на расстояниях порядка 100 м, в то время как существующие литературные оценки дают величину на порядок больше, в частности, в [2] для частоты 100 МГц указываются дистанции 1 км или «несколько меньшие».

Известно, что в VHF диапазоне целесообразно рассмотрение процессов распространения волн в лесной среде как в слабопоглощающем слое с некоторой эффективной относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_{eff} [2]. Определение данной величины является весьма сложной задачей, поскольку в общем случае она является тензорной и зависит от многих факторов – плотности и видового состава лесного покрова, влажности, сезонных изменений свойств растительности – и существенным образом изменяется с частотой. Для определения эффективной диэлектрической проницаемости растительности используются различные теоретические подходы, которые обеспечивают хорошие результаты последующего моделирования распространения волн в лесной среде только в определенной полосе частот и для конкретного типа растительности. Прямые измерения электрофизических параметров лесного покрова весьма немногочисленны [3].

В данной работе предлагается метод определения комплексной эффективной диэлектрической проницаемости, базирующийся на проведении непосредственных измерений ослабления поля в лесу. В соответствии с [4] будем считать в интересующем нас частотном диапазоне лесную среду изотропной. Тогда определение ее диэлектрической проницаемости можно свести к независимым измерениям действительной и мнимой частей скалярной величины. Основанием для этого служит тот факт, что по существующим в настоящее время оценкам в VHF – UHF диапазонах мнимая часть ϵ_{eff} , описывающая ослабляющие свойства растительности, на один - два порядка меньше величины $Re(\epsilon_{\text{eff}}) - 1$, характеризующей отличие диэлектрических свойств лесного слоя и воздуха. Т.е. по своим электрофизическим характеристикам лесная среда аналогична несовершенному диэлектрику, а, следовательно, процессы отражения и преломления волн на верхней кромке леса будут зависеть, в основном, от действительной части его диэлектрической постоянной.

Таким образом, определение ϵ_{eff} может быть выполнено на основе анализа дистанционных зависимостей уровня поля в лесной среде, подобных представленным на рис. 1 и 2. Например, рассмотрим данные на рис. 1. Как было указано выше, в пределах удаления приемной антенны от излучателя на 20-80 метров наблюдается спадание уровня поля, связанное с поглощающим и рассеивающим действием лесной растительности. Именно на таких расстояниях поведение поля и является типичным для случая прохождения излучения сквозь лесной покров, поскольку на меньших дистанциях велика амплитуда первичных волн, непосредственно распространяющихся между антеннами без взаимодействия с элементами растительности, а на больших - «включается» механизм боковой волны. Аппроксимируем рассматриваемую кривую функцией $20 \lg(e^{-k''R}/R)$, где R – расстояние, пройденное волной в лесу, k'' - определяемая таким образом мнимая часть волнового числа, характеризующая ослабляющие свойства лесной среды и равная в данном случае $7,78 \times 10^{-3} \text{ м}^{-1}$.

Далее определим вещественную часть эффективной диэлектрической проницаемости, для чего рассмотрим пути распространения двух основных типов волн в лесу (рис. 3). Первая распространяется непосредственно сквозь растительный покров по пути А-D, при этом ее амплитуда убывает по закону $e^{-k''R}/R$. Изменение амплитуды волн второго типа – боковых, проходящих путь А-B-C-D, может быть описано выражением [5]

$$\frac{1}{k_0(n^2 - 1) \sqrt{R} \cdot L^{3/2}} e^{-k''(\eta+r_2)}$$

где $n = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$ - показатель преломления лесной среды, k_0 - волновое число в свободном пространстве.

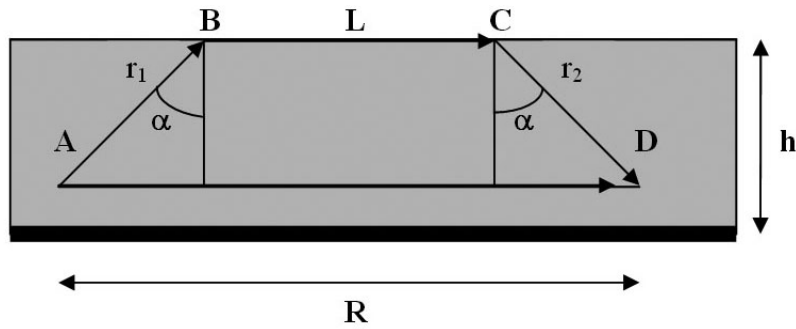


Рис. 3

Из рис. 1 следует, что при пространственном разnose антенн около 80 метров механизм распространения волн через лесной слой качественно меняется, а именно, боковая волна становится доминирующей. Очевидно, что на такой дистанции амплитуды волны прямого прохождения и боковой волны сравниваются, а, следовательно, можно положить:

$$\frac{e^{-k'R}}{R} = \frac{1}{k_0(n^2 - 1)} \frac{e^{-k''(r_1+r_2)}}{\sqrt{R} \cdot L^{3/2}}. \quad (1)$$

Выразим все величины, входящие в (1), через расстояние между антеннами R , среднюю высоту древостоя h , и угол падения волны на верхнюю кромку леса α , который в данном случае является углом полного внутреннего отражения и определяет условия формирования боковой волны. Полагая, что $r_1 \approx r_2 = r$, $n = 1/\sin \alpha$, и учитывая, что $h = r \cdot \cos \alpha$, $L = R - 2h \operatorname{tg} \alpha$, получаем

$$e^{-k''\left(R - \frac{h}{\cos \alpha}\right)} = \frac{1}{k_0\left(\left(\frac{1}{\sin \alpha}\right)^2 - 1\right)} \frac{\sqrt{R}}{(R - 2h \operatorname{tg} \alpha)^{3/2}}. \quad (2)$$

Трансцендентное уравнение (2) относительно неизвестной α имеет единственное решение, которое в рассматриваемом случае равно $69,9^\circ$. Зная угол полного внутреннего отражения, определяем действительную часть эффективной диэлектрической проницаемости

$$\operatorname{Re}(\varepsilon_{\text{eff}}) = \frac{1}{(\sin \alpha)^2}.$$

Таким образом, исследовавшийся лесной массив на частоте 150 МГц может быть охарактеризован диэлектрической проницаемостью с вещественной частью равной 1,12, что соответствует известным литературным оценкам [6].

Для определения мнимой части ε_{eff} воспользуемся представлением о лесном слое как о несовершенном диэлектрике. Запишем выражение для волнового числа в такой среде в виде

$$k = k' - ik'' = \omega \sqrt{(\operatorname{Re} \varepsilon_{\text{eff}} - i \operatorname{Im} \varepsilon_{\text{eff}}) \varepsilon_0 \mu_0}, \quad (3)$$

где ε_0 и μ_0 - соответственно диэлектрическая и магнитная постоянные, ω - циклическая частота. Полагая $\operatorname{Re} \varepsilon_{\text{eff}} \gg \operatorname{Im} \varepsilon_{\text{eff}}$, разложим выражение (3) в ряд и пренебрежем всеми членами за исключением первого. Тогда

$$k = \omega \sqrt{\operatorname{Re}(\varepsilon_{\text{eff}}) \varepsilon_0 \mu_0} \left(1 - i \frac{1}{2} \frac{\operatorname{Im} \varepsilon_{\text{eff}}}{\operatorname{Re} \varepsilon_{\text{eff}}}\right). \quad (4)$$

Значение мнимой части волнового числа было определено нами выше. Приравнивая его мнимой части выражения (4), находим, что $\operatorname{Im} \varepsilon_{\text{eff}} = 5,28 \times 10^{-3}$, что также не противоречит литературным данным.

Таким образом, предложенная методика позволяет определять эффективную диэлектрическую проницаемость лесной растительности путем прямых измерений ослабления электромагнитных волн VHF диапазона при прохождении через нее. Достоинством данного подхода, на наш взгляд, являются

простота, высокая точность получаемых результатов, возможность определения параметров реальных лесов, учитывающих видовой состав леса, его внутреннюю структуру (например, наличие подлеска), сезонные особенности прохождения сигналов и т.д. – всех тех факторов, учет которых затруднителен при построении теоретических моделей. Однако, несомненно, данный метод может использоваться только в полосе частот, на которых возможно распространение боковых волн, скользящих вдоль верхней кромки лесного покрова.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 08-02-98003 «Радиозондирование земной поверхности в Байкальском регионе».

ЛИТЕРАТУРА

1. А.А.Чухланцев, А.М.Шутко, С.П.Головачев. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами. – Радиотехника и электроника, 2003, т. 48, № 11, с. 1285-1311.
2. T.Tamir. On radio-wave propagation in forest environments. - IEEE Trans. on Anten. and Propag., 1977, vol. 25, no. 4, pp. 471-477.
3. В.Б.Кашкин, В.И. Кокорин, В.Л.Миронов, С.В.Сизасов. Экспериментальное определение электрофизических параметров лесного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. – Радиотехника и электроника, 2006, т. 51, № 7, с. 825-830.
4. K.Sarabandi, I-S.Koh. Effect of Canopy-Air Interface Roughness on HF-VHF Wave Propagation in Forest. - IEEE Trans. on Anten. and Propag., 2002, vol. 50, no. 2, pp. 111-121.
5. Л.М.Бреховских. Волны в слоистых средах. – М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957.
6. А.Н.Куликов, А.Л.Магазинникова. Метод расчета среднего поля УКВ в лесу. – Радиотехника, 1997, № 10, с. 57-59.