

УДК 621.396.96.01

## **МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЛЕСНОГО ПОЛОГА**

**Б. В. Басанов, А. Ю. Ветлужский, В. П. Калашников**

**Отдел физических проблем  
при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН**

Получена 28 апреля 2010 г.

**Аннотация.** В работе рассматривается метод определения эффективной диэлектрической проницаемости растительных сред в низкочастотной части УКВ диапазона. В основе метода лежит анализ экспериментально полученных дистанционных зависимостей уровня сигнала в лесном пологе с целью определения траектории распространения боковых волн, скользящих вдоль верхней кромки леса при погружении в него приемной и передающей антенн. Полученные результаты хорошо укладываются в рамки известных значений диэлектрической проницаемости лесных сред, определенных иными методами.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн, лесная растительность, боковая волна, эффективная диэлектрическая проницаемость

### **Введение**

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 лесов 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 среды. Подробный обзор современного состояния вопроса, касающегося изучения электродинамических свойств растительных сред, дан в работе [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 [2].

Говоря о прохождении радиоволн УКВ 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 УКВ диапазоне частот можно пренебречь [3].

Цель данной работы – разработка метода определения эффективной диэлектрической проницаемости на основе прямых измерений дистанционных зависимостей уровня поля в лесах различного типа и выявления условий формирования боковых волн.

## Экспериментальные исследования дистанционных зависимостей уровня поля в лесной среде

Эксперименты проводились в двух разных по видовому составу растительности типах леса. Первая серия измерений выполнялась в хвойном (сосновом) лесу. Структурной особенностью его являлось то, что основную часть биомассы леса составляли стволы деревьев. Подлесок практически отсутствовал. Средняя высота деревьев равнялась 15 м, средний диаметр стволов – 30 см, плотность древостоя  $0,07 \text{ м}^{-2}$ .

Антенны располагались в лесу на высоте 2 м над поверхностью земли. Передающая антенна представляла собой несимметричный четвертьволновый вибратор, приемная - полуволновый симметричный вибратор. Измерения проводились на частоте 150 МГц при вертикальной поляризации. Выходная мощность генератора составляла 1,5 Вт. Определялись дистанционные зависимости уровня поля в исследуемом лесу в интервале расстояний между антеннами от 1 до 260 м. Указанные эксперименты проводились в весеннее время на 3 трассах, в пределах которых на каждой дистанционной отметке выполнялась серия из пяти измерений при некотором смещении приемной антенны в поперечном направлении. Полученные таким образом результаты впоследствии усреднялись.

Модель распространения волн в лесном покрове представлена на рисунке 1. Здесь  $h$  – высота деревьев,  $h_1$  и  $h_2$  – высота антенн от поверхности земли,  $R$  – расстояние между передающей и приемной антеннами,  $r_1$  и  $r_2$  – расстояния, пройденные волной в лесной среде, при выполнении условий формирования боковой волны.

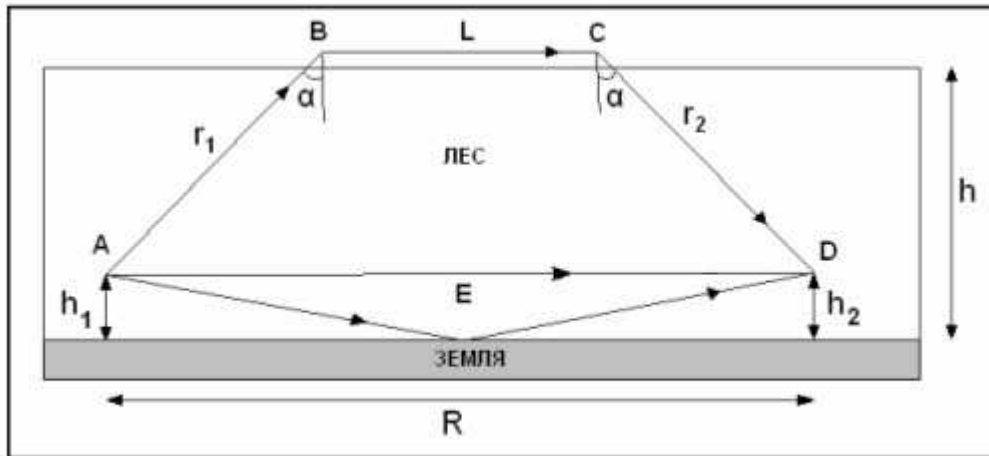


Рис. 1. Возможные механизмы распространения волн в лесу

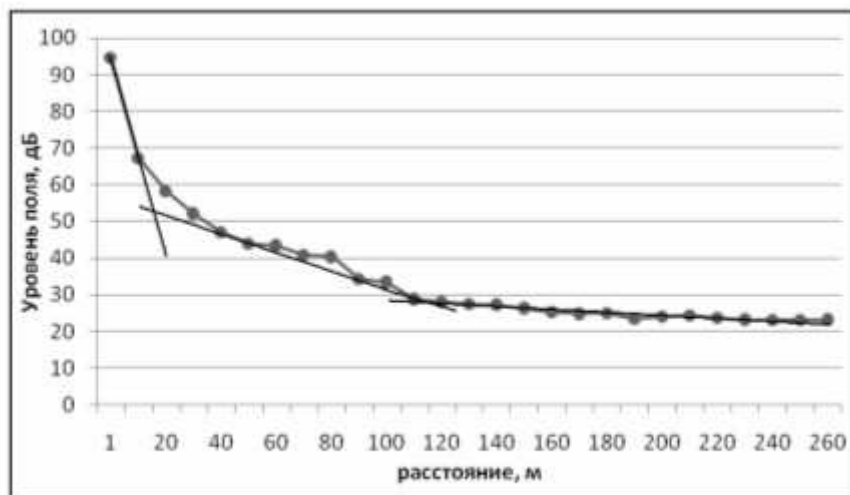


Рис. 2. Дистанционная зависимость уровня поля в лесу

На рис. 2 показана дистанционная зависимость уровня поля, которая была получена в результате усреднения экспериментальных данных. На представленном графике видны три участка, характеризующихся различной скоростью убывания уровня поля с расстоянием.

Первый - интенсивного спада поля - приходится на относительно малые дистанции до 20 м. Данный участок 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) компонент.

Второй приходится на расстояние до 110 м. Этот 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 характеризуется наименьшей скоростью ослабления поля. Это может быть объяснено тем, что на расстояниях от 110 м и выше распространение излучения в данном лесу происходило за счет формирования боковой волны, скользящей над верхушками деревьев и определяющей дальнейший ход дистанционных зависимостей.

Дистанции, на которых происходит смена указанных механизмов распространения радиоволн в лесной среде, определялись путем построения линий тренда так, как это выполнено на рис. 2.

Для выяснения вопроса о достоверности такой трактовки физических процессов, приводящих к полученному виду дистанционных зависимостей поля в лесу, был выполнен ряд дополнительных экспериментов. В частности, была получена аналогичная зависимость уровня излучения от расстояния между антеннами на открытой местности (в поле), и определен относительный характер ослабления поля в лесу по сравнению с распространением вдоль земной поверхности, не покрытой растительностью (рис. 3).

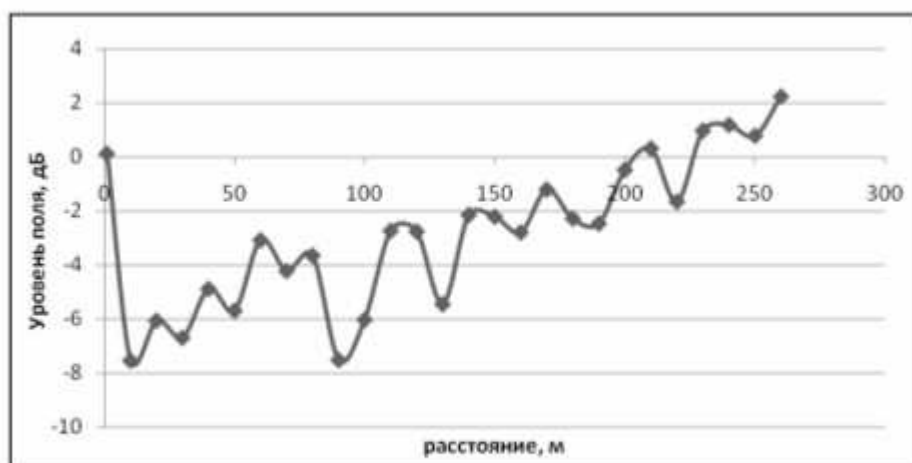


Рис. 3. Дистанционная зависимость относительного уровня поля в лесу по сравнению с открытой местностью

Из анализа графика видно, что ослабление поля существенно только на небольших дистанциях между антеннами. Уже на расстоянии порядка 200 метров различие в поведении поля в лесу и на открытой местности практически

исчезает. Это вполне укладывается в рамки вышеприведенных рассуждений о том, что на таких дистанциях определяющее влияние на характер поведения поля в лесу оказывают именно боковые волны, которые, являясь дифракционными, имеют ту же амплитудную зависимость от расстояния, что и волны, скользящие вдоль поверхности земли.

Кроме того, были исследованы особенности распространения волн в неоднородном лесном покрове в условиях холмистого рельефа земной поверхности. Поперечный профиль рассматривавшейся радиотрассы схематично представлен на рис. 4. Лесная растительность полностью соответствовала вышеприведенному описанию за исключением несколько большей плотности древостоя –  $0,08 \text{ м}^{-2}$ . Вблизи вершины холма находилась просека шириной около 3 м.

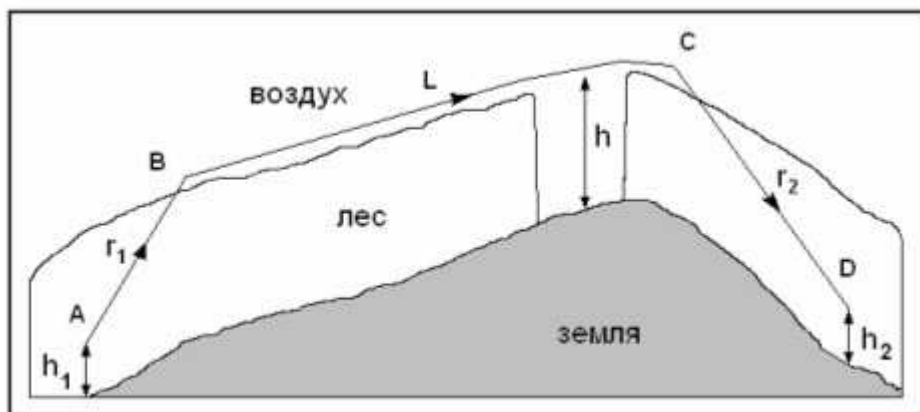
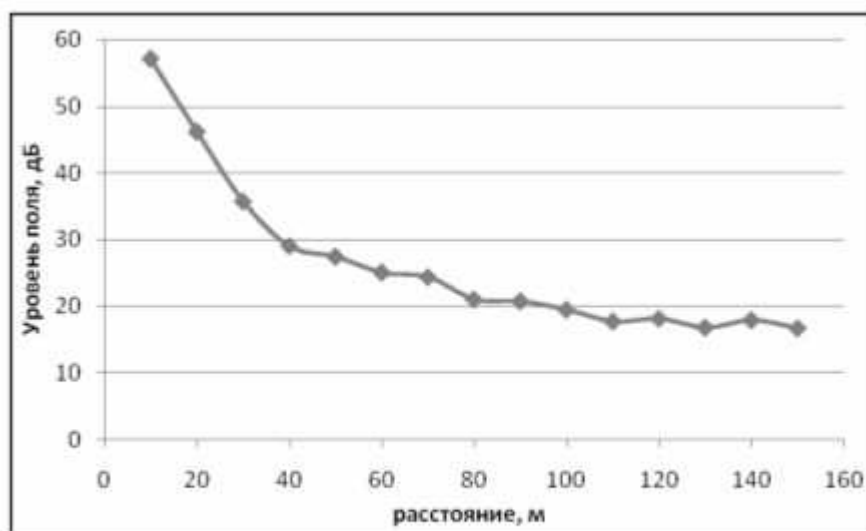


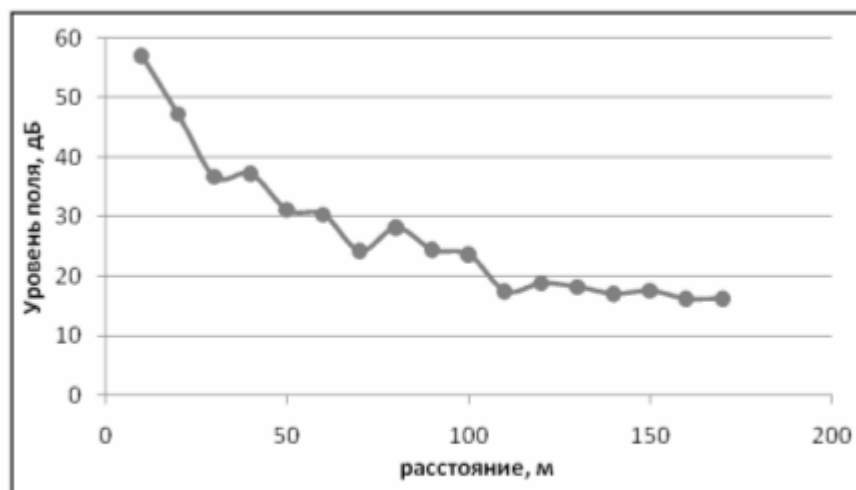
Рис. 4. Схема проведения экспериментов в неоднородном лесу

На рис. 5 представлены результаты измерений дистанционных зависимостей уровня поля в однородном лесу, полученные на пологом склоне холма и усредненные по 5 реализациям. Участок леса был выбран с таким расчетом, чтобы на результатах не сказывалось влияние просеки.



*Рис. 5. Дистанционная зависимость уровня поля в однородном лесу*

Данные на рис. 6 были получены в ситуации, когда на расстоянии 110 м от передающей антенны располагалась просека, а при удалении приемной антенны на 120 м и далее она оказывалась в области тени холма. Тем не менее, как следует из представленных данных, флуктуации уровня поля, которым, на первый взгляд, следовало бы проявиться в районе неоднородности лесного покрова, на дистанциях свыше 110 м отсутствуют. Однако на начальном участке полученная зависимость имеет ярко выраженный немонотонный характер. Это может быть вновь объяснено тем, что распространяющаяся на больших расстояниях боковая волна «не замечает» незначительных неоднородностей и изгибов профиля трассы [4]. В свою очередь, флуктуации поля на начальных участках трассы вызваны интерференционным сложением прямых и отраженных от просеки волн.



*Рис. 6. Дистанционная зависимость уровня поля в условиях неоднородности лесного покрова*

Таким образом, полученные результаты могут служить подтверждением интерпретации выше представленных дистанционных зависимостей. А именно, действительно, уже начиная с расстояний свыше 100 м, распространение волн в рассматриваемом лесу на частоте 150 МГц происходит за счет механизма боковой волны. Для выяснения типичности представленных результатов и возможности получения качественно сходных зависимостей в других типах лесов, был выполнен ряд экспериментов в смешанном лесу, состоящем 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. В ходе экспериментов определялись дистанционные зависимости уровня поля в данном лесу в интервале расстояний между антеннами от 3 до 180 м. Рассматривалось поведение поля на двух участках с разной плотностью древостоя и для двух поляризаций приемной и передающей антенн относительно земной поверхности.



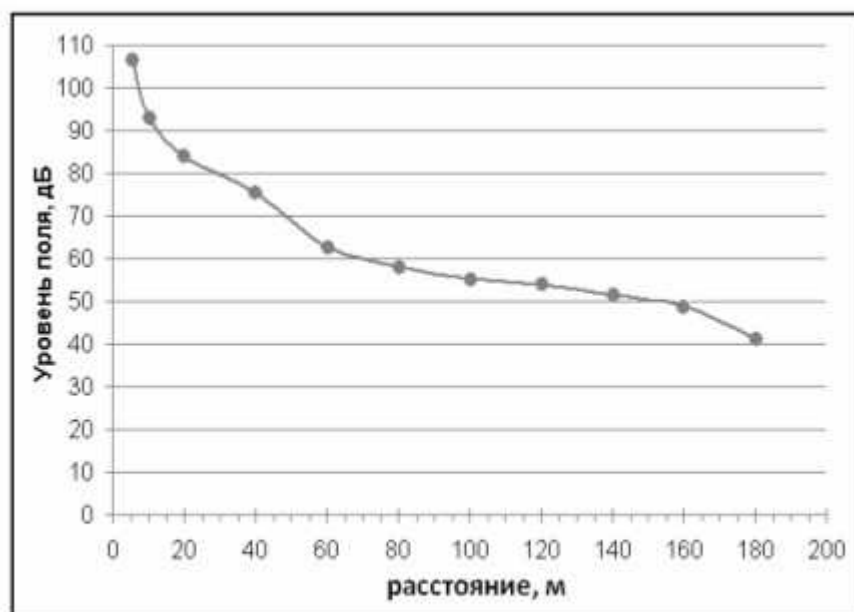


Рис. 7. Дистанционная зависимость уровня поля в смешанном лесу со средней плотностью древостоя  $0,24 \text{ м}^{-2}$  (вертикальная поляризация)

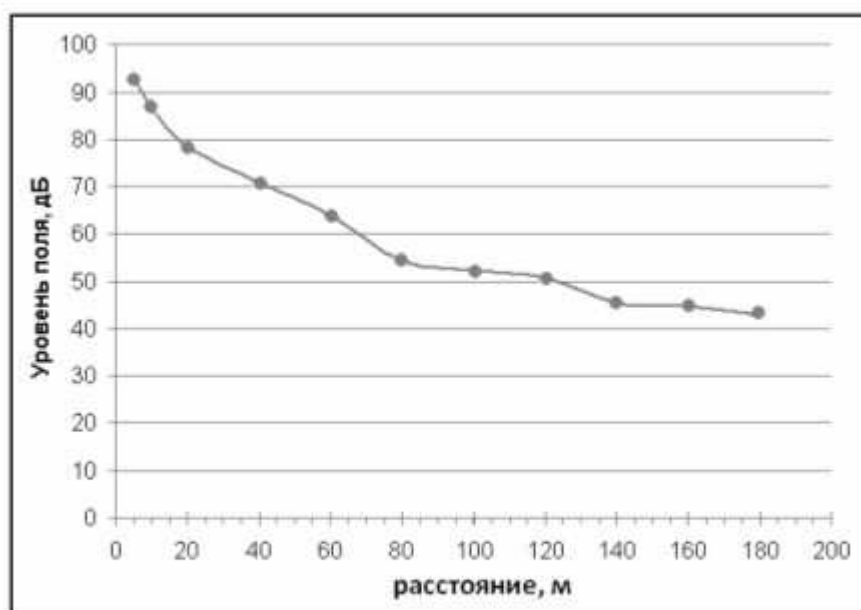


Рис. 8. Дистанционная зависимость уровня поля в смешанном лесу со средней плотностью древостоя  $0,24 \text{ м}^{-2}$  (горизонтальная поляризация)

На рис. 7, 8 представлены полученные зависимости для участка леса средней плотностью  $0,24 \text{ м}^{-2}$ , на рис. 9, 10 – для аналогичного по видовому составу участка леса плотностью  $0,16 \text{ м}^{-2}$ .

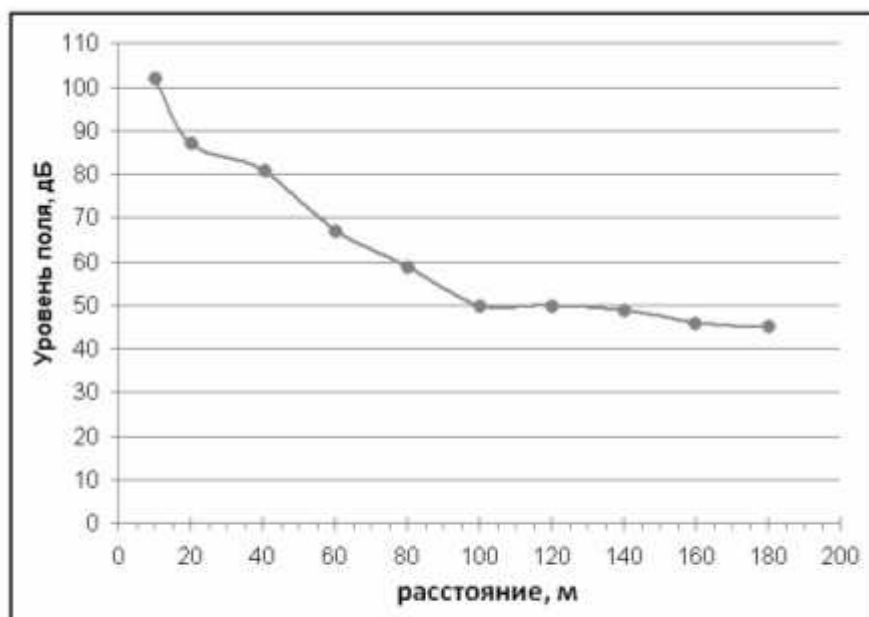


Рис. 9. Дистанционная зависимость уровня поля в смешанном лесу со средней плотностью древостоя  $0,16 \text{ м}^{-2}$  (вертикальная поляризация)

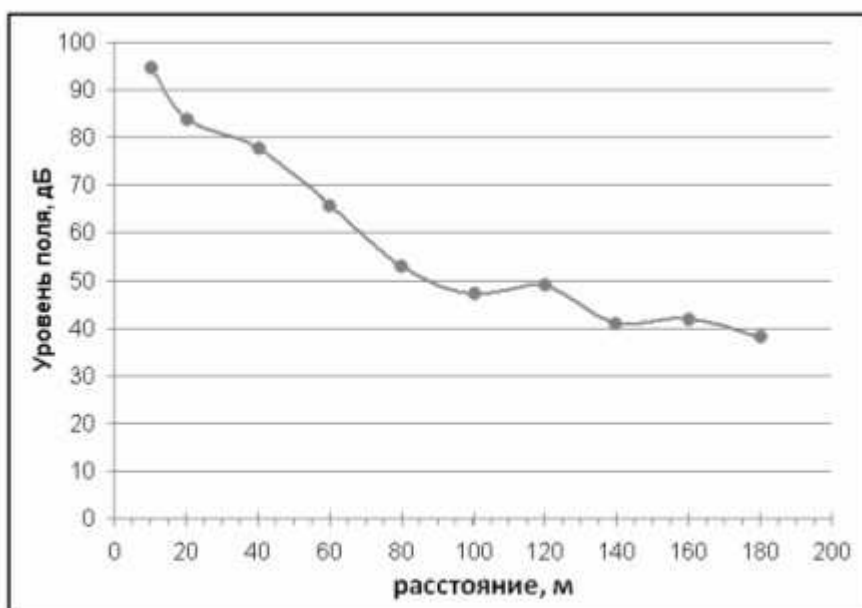


Рис. 10. Дистанционная зависимость уровня поля в смешанном лесу со средней плотностью древостоя  $0,16 \text{ м}^{-2}$  (горизонтальная поляризация)

Указанные эксперименты были выполнены в летнее время. Для выявления сезонных особенностей распространения волн в лесу были выполнены повторные измерения дистанционных зависимостей поля на том же участке леса с плотностью  $0,24 \text{ м}^{-2}$  в весеннее - зимний период (температура воздуха в ходе выполнения экспериментов составляла  $-4 \div -8^\circ\text{C}$ , присутствовал снежный покров). Эти результаты представлены на рис. 11.

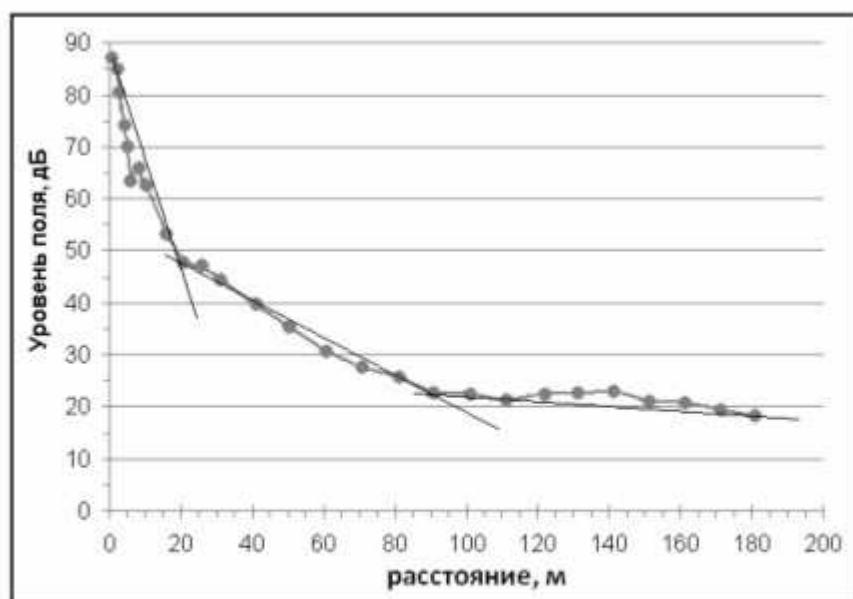


Рис. 11. Дистанционная зависимость уровня поля для средней плотности древостоя  $0,24 \text{ м}^{-2}$  (зимнее время, вертикальная поляризация)

На всех полученных графиках вновь можно выделить три характерных участка, которые были ранее выявлены на соответствующих зависимостях, полученных в хвойном лесу. Расстояния, на которых происходила смена вышеописанных механизмов распространения волн в лесной среде, вновь определялись путем построения линий тренда так, как это выполнено на рис. 11.

Если сравнить данные на рис. 7 - 8 и 9 - 10 соответственно, легко видеть, что боковая волна проявляется в более густом из исследовавшихся участков леса на отметке 80 - 90 м, а в более редком – на дистанциях 90 - 100 м, как это и следует из общей теории распространения волн в слоистых средах. При этом существенного влияния поляризационных характеристик излучения на момент появления боковой волны выявлено не было. Из рис. 11 следует, что в условиях отсутствия листвы, и, как следствие, с уменьшением плотности растительности формирование боковой волны происходит на несколько больших дистанциях, чем в летний период.

На наш взгляд, важным выводом, следующим из полученных результатов, является также то, что во всех рассмотренных случаях боковая волна выявлялась на расстояниях между антеннами около 100 м. В то же время

существующие литературные оценки дают величину на порядок больше, в частности, в [4] для частоты 100 МГц указываются дистанции 1 км или «несколько меньшие».

### **Метод определения диэлектрических свойств лесного покрова на основе анализа условий формирования боковых волн**

Известно, что в низкочастотной части УКВ диапазона целесообразно рассмотреть процессы распространения волн в лесной среде как в слабопоглощающем слое с некоторой эффективной относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{\text{eff}}$  [4]. 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 [5].

В данной работе предлагается метод определения комплексной эффективной диэлектрической проницаемости, базирующийся на проведении непосредственных измерений ослабления поля в лесу. В соответствии с [6] 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 метровой - дециметровой частях УКВ диапазона мнимая часть  $\epsilon_{\text{eff}}$ , описывающая ослабляющие свойства растительности, на один - два порядка меньше величины  $\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}}) - 1$ , 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.

Тогда определение  $\epsilon_{\text{eff}}$  может быть выполнено на основе анализа дистанционных зависимостей уровня поля в лесной среде, подобных выше представленным. Например, рассмотрим данные на рис. 11. Как было указано выше, в пределах удаления приемной антенны от излучателя на 20-85 метров наблюдается спадание уровня поля, связанное с поглощающим и рассеивающим действием лесной растительности. Именно на таких расстояниях поведение поля и является типичным для взаимодействия излучения с лесной растительностью, 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. 1). Первая распространяется непосредственно сквозь растительный покров по пути А-Д, при этом ее амплитуда убывает по закону  $e^{-k''R}/R$ . Изменение амплитуды волн второго типа – боковых, проходящих путь А-В-С-Д, может быть описано выражением [7]

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

где  $n = \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}$  - показатель преломления лесной среды,  $k_0$  - волновое число в свободном пространстве. Из рис. 11 следует, что при пространственном разnose антенн около 85 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  $\alpha$ , 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

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

Трансцендентное уравнение (2) относительно неизвестной  $\alpha$  имеет единственное решение, которое в рассматриваемом случае равно  $69.9^\circ$ . Зная угол полного внутреннего отражения, определяем действительную часть эффективной диэлектрической проницаемости

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

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 [8].

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

$$k = k' - ik'' = \omega \sqrt{(\operatorname{Re} \epsilon_{\text{eff}} - i \operatorname{Im} \epsilon_{\text{eff}}) \epsilon_0 \mu_0}, \quad (3)$$

где  $\epsilon_0, \mu_0$  - диэлектрическая и магнитная постоянные,  $\omega$  - циклическая частота. Полагая  $\text{Re } \epsilon_{\text{eff}} \gg \text{Im } \epsilon_{\text{eff}}$ , разложим выражение (3) в ряд и пренебрежем всеми членами за исключением первого. Тогда

$$k = \omega \sqrt{\text{Re}(\epsilon_{\text{eff}}) \epsilon_0 \mu_0} \left( 1 - i \frac{1}{2} \frac{\text{Im} \epsilon_{\text{eff}}}{\text{Re} \epsilon_{\text{eff}}} \right). \quad (4)$$

Значение мнимой части волнового числа было определено нами выше. Приравнявая его к мнимой части выражения (4), находим, что  $\text{Im} \epsilon_{\text{eff}} = 0,00528$ , что также не противоречит литературным данным.

Применение данной методики для анализа дистанционных зависимостей уровня поля в лесах меньшей плотности (рис. 2), приводит к следующим результатам:  $\alpha = 74^0$ ,  $\text{Re} \epsilon_{\text{eff}} = 1,082$ ,  $\text{Im} \epsilon_{\text{eff}} = 0,0042$ . Т.е. уменьшение концентрации растительности в лесном покрове приводит к уменьшению значения его эффективной диэлектрической проницаемости, что физически достаточно очевидно.

### Заключение

В работе представлены результаты экспериментальных исследований влияния видовых и структурных свойств лесной растительности на особенности распространения в ней электромагнитных волн. Подтверждена особая роль боковых волн и доказана возможность их формирования для лесов средней плотности уже на дистанциях порядка 100 м в метровом диапазоне длин волн. Разработана методика определения эффективной диэлектрической проницаемости лесной растительности на основе прямых измерений ослабления поля в лесном пологом, и получены ее значения для различных типов леса. Достоинством данного метода, 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 формирование боковых волн, скользящих вдоль верхней кромки лесного покрова.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 08-02-98003.

### **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. P. Pampaloni. Microwave radiometry of forests // Waves in Random Media. 2004. № 14. P. 275-298.
3. T. Tamir. On radio wave propagation in forest environments // IEEE Trans. Antennas and Propag. 1967. Vol.15. № 6. P. 806-817.
4. T. Tamir. Radio wave propagation along mixed paths in forest environments // IEEE Trans. on Antennas and Propag. 1977. Vol. 25. № 4. P. 471-477.
5. 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.
6. K. Sarabandi, I-S. Koh. Effect of Canopy-Air Interface Roughness on HF-VHF Wave Propagation in Forest // IEEE Trans. on Antennas and Propag. 2002. Vol. 50. № 2. P. 111-121.
7. Л.М. Бреховских. Волны в слоистых средах. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957.
8. А.Н. Куликов, А.Л. Магазинникова. Метод расчета среднего поля УКВ в лесу // Радиотехника. 1997. № 10. С. 57-59.