

ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630.52:587/588

DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.48

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СИГНАЛА ПРИ РАДИОЧАСТОТНОМ МОНИТОРИНГЕ ЛЕСНОЙ СРЕДЫ

С. П. Санников, В. В. Побединский, И. В. Бородулин, А. А. Побединский

Уральский государственный лесотехнический университет,
Российская Федерация, 620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37
E-mail: ssp-54@mail.ru, pobed@el.ru

Рассмотрена проблема радиочастотного мониторинга лесного фонда. Основное внимание уделено электрическим свойствам древостоя и лесной среды. Разработаны: методика и аппаратура экспериментальных исследований; расчётная модель исследования радиочастотного сигнала в лесной среде; аналитические модели характеристик сигнала в лесной среде. Выполнены исследования влияния лесной среды и отдельных элементов древостоя на характеристики радиочастотного сигнала. На основе теоретических и экспериментальных исследований получены уравнения зависимости потери мощности электромагнитных волн от различных параметров элементов леса и от комплексной диэлектрической проницаемости лесной среды.

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость леса; лесная среда; потери мощности радиосигнала.

Введение. Мониторинг лесного фонда с использованием современных технологий является практическим направлением, которое получило поддержку на государственном уровне в качестве одного из приоритетных в лесной отрасли (Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года / Правительство Российской Федерации. Распоряжение № 1724-р от 26 сентября 2013 г.). Наиболее совершенной системой для мониторинга лесного фонда, как было обосновано в работах [1–2], является сеть наземных устройств типа RFID (радиочастотной идентифика-

ции), способная обеспечить непрерывный контроль состояния лесной среды, любые перемещения лесоматериалов, включая с мест незаконных рубок, возникновение пожаров и многие другие характеристики. Такая система может использоваться со спутниковой ГИС, объединяя преимущества обеих систем. Вместе с тем, для проектирования систем на основе технологии RFID необходимы данные, которые на сегодня отсутствуют, а получить их чрезвычайно сложно, т. к. это новое направление в лесной науке не обеспечено теоретическими разработками, экспериментальными методиками и аппаратурой, что является серьёзным препятствием для внедрения

© Санников С. П., Побединский В. В., Бородулин И. В., Побединский А. А., 2017.

Для цитирования: Санников С. П., Побединский В. В., Бородулин И. В., Побединский А. А. Экспериментальное исследование характеристик сигнала при радиочастотном мониторинге лесной среды // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 4 (36). С. 48–58. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.48

прогрессивных технологий в практику управления лесным фондом и лесопользованием РФ [3–6].

Из вышеприведённого следует, что исследования, направленные на разработку теоретических моделей для проектирования систем мониторинга, методик и экспериментальной аппаратуры для получения соответствующих данных, являются актуальными.

Целью настоящих исследований являлась разработка аналитических и получение экспериментальных моделей основных параметров радиочастотного сигнала в лесной среде, а также методики и аппаратуры экспериментальных исследований для получения характеристик элементов леса, влияющих на потерю мощности радиосигнала.

Для реализации поставленной цели решались следующие **задачи**:

- 1) разработка методики и аппаратуры экспериментальных исследований;
- 2) разработка расчётной модели исследования радиочастотного сигнала в лесной среде;
- 3) разработка аналитических моделей характеристик сигнала в лесной среде;
- 4) исследование влияния лесной среды и отдельных элементов древостоя на характеристики радиочастотного сигнала;
- 5) обработка и анализ результатов исследований.

Объекты и методы исследования.

Общепринятая технология по сбору данных об основных параметрах леса (диаметр и высота ствола дерева, объём фитомассы и пр.) заключается в использовании пробных площадей, на которых производят измерения параметров лесного фонда в определённом промежутке времени. Недостатком данного способа является продолжительное время, которое исчисляется сезонами и годами. Сбор данных осуществляется экспедициями. Трудоёмкость такого способа сбора информации о динамике леса чрезвычайно высока, способ имеет низкую оперативность, а также сказывается человеческий

фактор на точность измерения параметров. Внимание многих исследователей уделяется проблеме совершенствования методик сбора данных, которые могут использовать и методы моделирования массивов древостоя, но проблема остаётся нерешённой.

Специфическая особенность проблемы заключается в том, что лес является средой с неоднородной дискретной структурой, которая оказывает влияние на прохождение радиосигнала, порождая различные явления, присущие электромагнитным волнам, например, дифракцию, рассеяние, отражение и т. д. Степень их влияния зависит от множества физических факторов, связанных со свойствами элемента леса (стволов, сучьев, хвои), а также почвы с растительным покровом [7–11]. Все элементы деревьев обладают различными геометрическими, диэлектрическими параметрами.

При разработке методики эксперимента учитывались первоочередные данные, которые необходимы для создания этих систем принципиально нового типа, следовательно, функциональное назначение и требования к системе мониторинга.

Основные функции, выполняемые предложенной [1–2] наземной системой мониторинга:

- проведение мониторинга движения сырьевых потоков в лесопромышленном производстве;
- обнаружение лесных пожаров в начальный момент возгорания;
- определение таксационных характеристик, прироста дерева и др.

Поскольку эти функции выполняют системы на основе сети устройств RFID, то в первую очередь для проектирования топологии сети и схемы размещения устройств RFID в лесу со встроенными в них датчиками необходимы значения величины падения мощности сигнала и диэлектрической проницаемости лесной среды и элементов леса [12–15].

Экспериментальная установка для исследования отдельных образцов деревьев

со срезами в радиальном и тангенциальном направлениях или отдельных элементов, например, сучков, веток, листьев и хвои, показана на рис. 1. Для автоматизации записи измерений и расчётов выходных параметров было разработано программное обеспечение, а в измерительный комплекс включён компьютер (рис. 1, б).

Для реализации методики разработана расчётная модель выполнения измерений

падения мощности радиочастотного сигнала в лесной среде (рис. 2).

При проведении эксперимента сканер оставался неподвижным и подключённым к компьютеру для записи показаний. Схема перемещения измерительного источника 1 показана на рисунке 2, а, со случайно расположенными деревьями на пути L от источника до сканера. Измерения проводились с шагом 5 и 10 м [16].

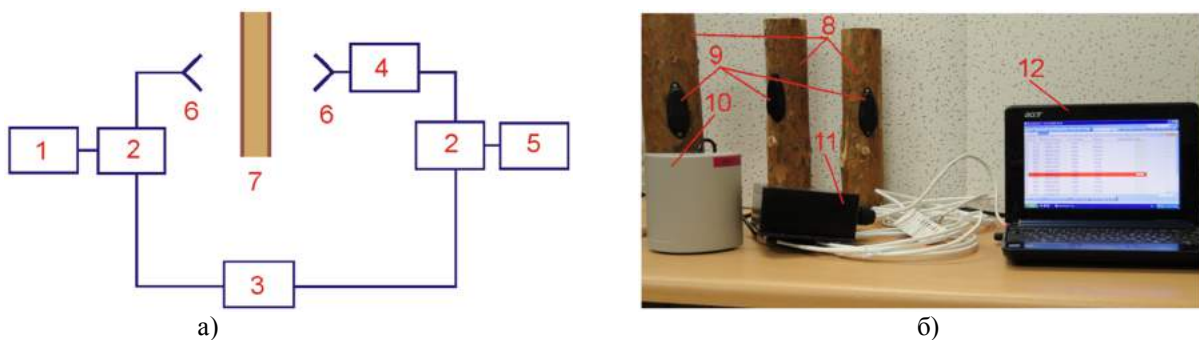


Рис. 1. Измерительный комплекс: а – структурная схема измерения падения мощности сигнала и диэлектрической проницаемости в измерительном резонаторе; б – общий вид измерительного комплекса; 1 – УВЧ генератор; 2 – разветвитель радиосигнала; 3 – аттенюатор; 4 – фазовращатель; 5 – индикатор резонанса; 6 – измерительный резонатор (передающая и приёмная антенны); 7 – образец измерения; 10 – антенна; 9 – датчики; 8 – образцы; 11 – приёмник; 12 – компьютер

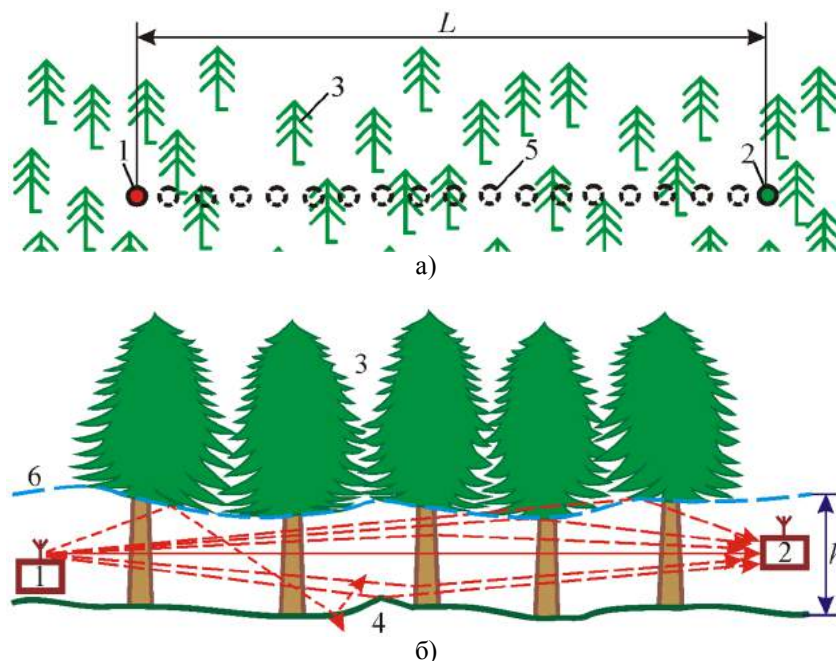


Рис. 2. Расчётная модель эксперимента: а – схема перемещения измерительного устройства; б – траектория распространения радиочастотного сигнала; 1, 2 – источник и сканер (измеритель) RFID; 3 – деревья; 4 – почва; 5 – промежуточное положение источника сигнала; 6 – линия полога леса; L – расстояние измерительного участка; h – высота под пологом [16]

Согласно схеме, электромагнитные волны от источника RFID 1 (рис. 2, б) распространяются к сканеру 2 не только по прямой линии, но и, отражаясь от поверхности стволов деревьев 3, почвы 4, кроны деревьев 3, поступают на антенну измерительного сканера 2, далее на компьютер, где производится обработка радиосигнала (вычисление падения мощности). Как видно из рис. 2, б, проходящий сигнал, многократно отражённый от различных элементов лесной среды, поступает с небольшой задержкой, поэтому измеренный сигнал содержит множество фазовых смещений, которые обрабатывались по методу Фурье [17]. Обработывая входной сигнал, определялись потери его по мощности, а разложение в ряд Фурье позволяло судить о характере влияния отдельных элементов лесной среды. Такая экспериментальная схема с автоматизированной системой сбора данных позволяет получать информацию не только о потерях мощности, но и другую информацию, например, о плотности лесонасаждений и др.

Согласно представлению А. Исимару [18], значение мощности радиосигнала в точке приёма соответствует теории многократного рассеивания радиоволн в лесном массиве со случайно-дискретным расположением деревьев и описано функцией:

$$U(\vec{r}_a) = \sum_{s=1}^N E(\Psi_i^s), \quad (1)$$

где E – величина напряжённости электромагнитного поля в направлении \vec{r}_a на пути распространения сигнала (В, дБм); Ψ_i^s – параметр, влияющий на прохождение радиоволн в массиве лесной среды определённым индексом дерева s , для i -го измерения; $U(\vec{r}_a)$ – тензор уровня потенциал поля радиосигнала.

Также из работы А. Исимару [18] следует взаимосвязь уровня потенциал поля радиосигнала $U(\vec{r}_a)$ с величиной рассеивания $W(\vec{l}_d)$

$$U(\vec{r}_a) \leftrightarrow W(\vec{l}_d). \quad (2)$$

Ослабление величины рассеивания радиосигнала зависит от физических свойств лесной среды, а именно от эффективной проводимости σ_3 и определяется выражением

$$\sigma_3 = \sum_i^n \sigma_i, \quad (3)$$

где σ_i – проводимость i элемента леса на пути распространения радиоволны; n – количество элементов леса на пути распространения радиоволны (деревья, подrost, кусты и пр.).

Тогда плотность энергии радиосигнала в точке приёмной антенны сканера зависит от волнового числа среды k , площади антенны S_a и определяется соотношением [19]

$$S_a = wG = EH, \quad (4)$$

где w – плотность энергии поля, равна сумме электрической и магнитной компонент $w = w_3 + w_m$; G – усреднённая плотность деревьев на измеряемом участке леса (густота насаждений), шт./га; E , H – электрическое и магнитное поле электромагнитной волны.

Компоненты плотности энергии поля можно записать через напряжённость по формуле

$$w = w_3 + w_m = (\epsilon_0 \epsilon E^2) / 2 + (\mu_0 \mu H^2) / 2, \quad (5)$$

где индекс 0 означает начальную проницаемость.

По утверждению О. И. Яковлева и др. [20], магнитная составляющая на дальних расстояниях практически не действует, поэтому в дальнейшем будем рассматривать только электрическую компоненту поля. Введём понятие ϵ^* комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) $\epsilon^* = \epsilon' + i\epsilon''$, которая состоит из действительной ϵ' и мнимой ϵ'' проницаемости среды (где i – мнимая единица, равная $\sqrt{-1}$).

В зависимости от вида прорастания деревьев на определённом участке леса и времени года показатели диэлектрической проницаемости (Ф/м) меняются в диапазоне в несколько единиц, имеющей вид [18]:

$$\varepsilon^\alpha = \sum_i V_i \varepsilon_i^\alpha, \quad (6)$$

где V_i – объёмная доля i -го компонента лесной среды (лесного полога); ε_i^α – комплексная диэлектрическая проницаемость лесной среды i -го элемента; α – константа, учитывающая особенности лесного массива.

Величина рассеивания радиоволн $W(\vec{l}_d)$ на исследуемом участке зависит от множества физических факторов, влияние которых необходимо дополнительно исследовать. В общем виде для определения величины рассеивания радиочастотного сигнала $W(\vec{l})$ предложена функция следующего вида:

$$W(\vec{l}) = \left[kl \langle E, J, S, \sigma, \varepsilon^*, G \rangle \right], \quad (7)$$

где k – волновое число среды, м^{-1} ; l – протяжённость от источника радиосигнала до точки наблюдения, м ; J – плотность тока в антенне, А/м^2 ; S – площадь поперечного сечения дерева, м^2 ; σ – удельная проводимость среды (волновое сопротивление), См/м .

В работе для моделирования взаимодействия радиочастотного сигнала с лесным пологом и расчёта уровня сигнала в точке измерения $U(x)$ была выведена следующая формула:

$$U(x) = U_0 \left(\varepsilon + \frac{1}{2\pi} \int \exp \left\{ ikx \left[1 - \frac{G(1-T)}{ik} \right] \right\} \right), \quad (8)$$

где U_0 – начальный уровень сигнала, измеренный на расстоянии 1 м от источника сигнала; T – параметр, связанный с физическими свойствами дерева, которые влияют на рассеивание электромагнитной энергии (определяется экспериментальным путём); x – расстояние от источника до сканера ($x \sim l$). Таким образом, были получены необходимые математические модели для сопровождения экспериментальных исследований. Проведены исследования влияния лесной среды и отдельных элементов древостоя на характеристики радиочастотного сигнала. Исследования

проводились на приёмопередатчиках в окрестностях Екатеринбурга и Красноуфимска с частотами 0,9 и 2,4 ГГц. Базовой основой для исследования являлись устройства с протоколом ZigBee в стандарте IEEE 802.15.4 [URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4040999/>].

Стволы деревьев, находящиеся в зоне распространения радиосигнала, являются средой рассеяния и влияют на величину дисперсии. Объём каждого ствола дерева V_i представляет долевым состав структуры, состоящей из коры, влаги и окружающего воздуха вблизи поверхности и пр. Определённая выше константа α показывает соотношение воздуха, жидкости и твёрдого материала древесины. При $\alpha = 1$ значения КДП суммируются, а при $\alpha = 0,5$ суммируются комплексные показатели преломления. Поскольку рассеянный сигнал является широкополосным, то для оценки его амплитуды использовалась теория аналитического сигнала [16].

На рис. 3 выделен фрагмент записи спектральной характеристики, полученной со сканера откликов распространения сигнала под пологом леса [16]. На диаграмме отчётливо выделяются характерные амплитудные структуры шумов отражённого сигнала от стволов деревьев. Расстояние рассчитывается по времени запаздывания через скорость распространения электромагнитной волны, т. е. путь отражённого сигнала. Этот сигнал представляет форму характеристики инвертированного зондирующего импульса.

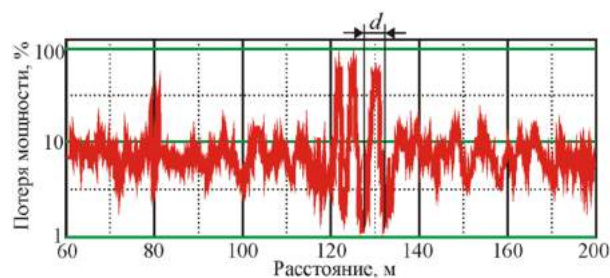


Рис. 3. Фрагмент записи процесса потери мощности измеренного радиосигнала: d – импульс сигнала, отражённого от ствола дерева

Длительность этого сигнала составляет $\approx 1,5$ нс, что при стандартной скорости распространения радиоволн соответствует ширине импульсного объёма. Расчётная величина будет примерно 16–18 см. Такой результат откликов лесного полога с принятым разрешением сигнала соответствует размерам стволов деревьев. На участке, где проводились исследования, среднее расстояние между деревьями составило от 5 до 9 м. Кроны деревьев не соприкасались. Измерение диаметров стволов деревьев ≈ 18 –20 см выполнялось с удалением от источника сигнала на расстояние более 100 м. На исследуемом участке, от линии прямой видимости, имелись другие деревья по обе стороны и кустарники высотой до 1 м. Источник сигнала и сканер располагались на штативе высотой 1,3 м от поверхности почвы. Рельеф почвы на исследуемых участках можно было считать условно ровным, т. е. без видимых подъёмов и впадин. В этих условиях проводились измерения.

Результаты и обсуждение. Как показали результаты работ, неоднородность строения лесного полога препятствует прохождению электромагнитных радиоволн. Установлено, что деревья, имеющие множество элементов в виде сучьев, листьев, хвои, стволов, по-разному влияют на рассеивание электромагнитной волны радиосигнала (рис. 4). Статистическая обработка результатов измерений мощности сигнала лесным пологом выполнена в системе STATISTICA.

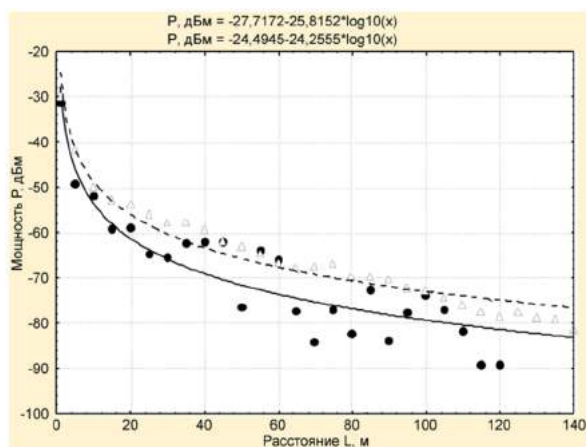


Рис. 4. Результат ослабления мощности сигнала лесным пологом

Древостои поглощают и рассеивают электромагнитную энергию на пути от трансивера к ресиверу (станции опроса) в зависимости от времени года и погодных условий, от состава, вида и расположения деревьев на местности, от густоты подлеска. Ослабление сигнала происходит внутри лесного массива.

Установлено, что в некоторых измерениях снижение мощности составляло не более 6–7 дБ. Это можно объяснить рельефом местности, природными и погодными условиями во время проведения измерения уровня сигнала.

На величину сигнала влияют характерные особенности поверхности стволов деревьев, вид шероховатости коры, размеры. В строении деревьев проявляются физические, химические свойства отражать или поглощать энергию электромагнитных волн. Так, цилиндрическая форма ствола дерева способствует рассеянию, т. е. отражению энергии в разные стороны. Частично энергия поглощается структурой древесины. Структура и строение ствола дерева, а также порода дерева для определённых длин волн влияют как пассивные ретрансляторы, поляризаторы, рассеиватели и поглотители электромагнитной энергии для ультравысоких и сверхвысоких частот УВЧ- и СВЧ-волн.

Выявлено, что предложенный выше параметр T , который связан с физическими параметрами, такими как влажность, порода, возраст и др., также связан и с геометрическими величинами ствола дерева (диаметр, высота дерева). Параметр T влияет на комплексную диэлектрическую проницаемость среды. Эта связь определена отношением длиной волны радиосигнала $\lambda = 2\pi/k$.

Отдельные результаты эксперимента представлены на рис. 5 и 6.

Получена регрессионная модель, описывающая зависимость мощности принимаемого сигнала P от расстояния L между приёмником сканера и источником радиосигнала:

$$P = -27,72 - 25,82 \lg L. \quad (9)$$

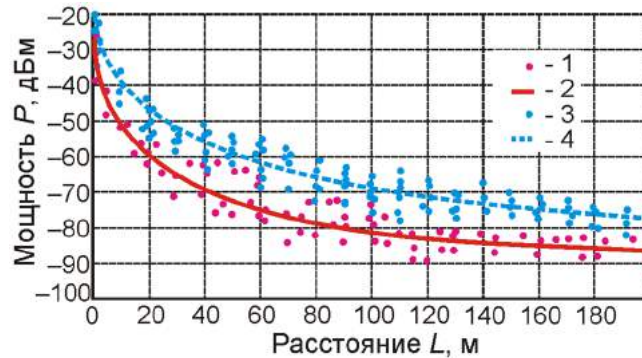


Рис. 5. Результаты экспериментальных исследований: 1, 2 – рассеивание радиоволн в сосновом лесу (экспериментальная и теоретическая зависимости); 3, 4 – рассеивание радиоволн в берёзовом лесу (экспериментальная и теоретическая зависимости)

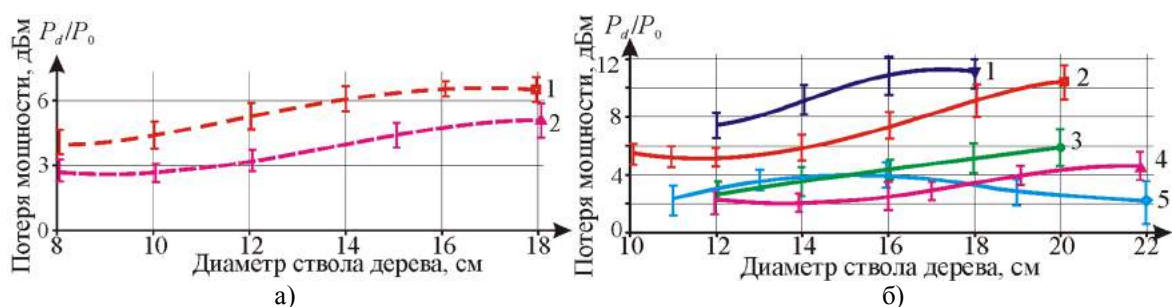


Рис. 6. Усреднённые данные рассеивания лиственных и хвойных пород леса: а) 1 – берёза; 2 – осина; б) 1 – тихта; 2 – ель; 3 – сосна; 4 – лиственница; 5 – кедр

Полученные экспериментальные зависимости потери мощности сигнала от диаметра ствола деревьев лиственных и хвойных пород представлены на рис. 6.

Анализ кривых на рис. 6 показывает, что величина падения мощности зависит от породы и диаметра ствола дерева. Все графики, представленные на рисунке, показывают на ослабляющую способность дерева, обусловленную строением структуры древесных волокон и возрастом образца. Это явление можно объяснить тем, что с возрастом дерева свойства его древесины меняются, например, кора становится рыхлой, способной поглощать электромагнитную энергию радиоволн. Другое влияние оказывает величина диаметра ствола дерева. С его увеличением снижается рассеивание (отражение) радиоволн в силу того, что увеличивается поверхность, размер которой становится соизмеримым с длиной радиоволны, т. е. не происходит дифракция радиоволн, как можно видеть на кривой 5 (рис. 6, б).

У деревьев с небольшим диаметром поверхность коры более гладкая, поэтому эф-

фект поглощения незначительный по сравнению с деревьями большим диаметром.

Влагосодержание коры с возрастом снижается, снижается и диэлектрическая проницаемость верхнего слоя коры, это приводит к снижению отражательной способности радиоволн поверхностью дерева.

Результаты проведённых исследований позволяют сделать следующие **выводы**:

1) предложенная система мониторинга в виде сети наземных устройств RFID с протоколом ZigBee в стандарте IEEE 802.15.4 имеет наиболее широкие функциональные возможности. Разработанные методика, аппаратура экспериментальных исследований и программные средства обработки получаемой информации позволяют реализовать технологию автоматизированного сбора данных о состоянии лесного фонда;

2) разработанная расчётная схема и экспериментальная аппаратура позволяют измерять характеристики радиосигнала на исследуемом участке леса. Полученные результаты согласуются с данными, полученными ранее [7, 10], где использовались

серийные радиолокационные системы большей мощности, чем рассмотренные устройства RFID;

3) предложены модели (1)–(9), (рис. 5, б) для определения влияния проводимости лесной среды и комплексной диэлектрической проницаемости на потерю мощности радиочастотного сигнала. Также определены зависимости влияния на по-

терю мощности отдельных элементов лесной среды. Экспериментальные данные показывают достаточную адекватность полученных результатов исследований, что позволяет рекомендовать их для проектирования топологии сети радиочастотного мониторинга в лесу, а также для использования при конструировании и совершенствовании устройств RFID.

Список литературы

1. Герц Э.Ф., Санников С.П., Соловьев В.М. Использование радиочастотных устройств для мониторинга экологической ситуации в лесах // Аграрный вестник Урала. 2012. № 1 (93). С. 37–39.
2. Герц Э.Ф., Санников С.П. Методика проведения мониторинга движения сырьевых потоков в лесопромышленном производстве на основе RFID-технологии // Формирование регионального лесного кластера: социально-экономические и экологические проблемы и перспективы лесного комплекса. Матер. VIII междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: УГЛТУ, 2011. С. 354–358.
3. Санников С.П., Герц Э.Ф., Дьячкова А.А. Методология дистанционного мониторинга древостоев и транспортных потоков древесины // Лесной журнал. 2016. С. 109–115 <http://narfu.ru/university/library/books/2780.pdf> (дата обращения: 23.11.2016).
4. Дьячкова А.А., Серков П.А. Радиочастотная томография. Моделирование системы мониторинга леса предложенным методом // Пути науки. 2015. № 3(13). С.31–33.
5. Kanso M. A., Rabbat M.G. Compressed RF tomography for wireless sensor networks: Centralized and decentralized approaches // Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, Marina Del Rey, June, 2009. 67 с.
6. Рафигов С.А., Санников С.П. Измерение характеристик дерева на основе механических колебаний его ствола // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России. Материалы XI Всероссийской науч.-техн. конф. Ч.1. Екатеринбург: УГЛТУ, 2015. С. 20–23.
7. Дистанционные исследования растительных покровов и лесов радиолокационными методами / Д.М. Бычков, А.С. Гавриленко, Л.А. Егорова, и др. // Материалы Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». Харьков, 2003. URL: <http://nauchebe.net/2012/07/distancionnye-issledovaniya-rastitelnykh-pokrovov-i-lesov-radiolokacionnyimi-metodami/> (дата обращения: 23.11.2016).
8. Lang R.H., Shneider A., Altman F.J. Scatter model for pulsed radio transmission through forests // MILCOM'83: Proc. IEEE Milit. Commun. Conf., Washington, D.C., New York. 1983. Vol. 2. P. 433–437.
9. Lang R.H., Schneider A., Diaz R. L-band attenuation in a trunk-dominated forest // IGARSS'87: Int. Geosci. and Remote Sens. Symp., Ann Arbor, Mich., 1987. Vol. 2. New York, 1987. P. 821–826.
10. Ахияров В.В. Рассеяние на статистически неровной поверхности с произвольными корреляционными свойствами // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://jre.cplire.ru/win/feb12/2/text.html> (дата обращения: 25.01.2013).
11. Гельцер А.А., Ворошилин Е.П., Ильченко В.П. Модель канала распространения радиоволн с однократным рассеянием в диапазоне УКВ [Электронный ресурс]. Томск: ТГУСУИР. 2007. URL: http://www.conf-ulstu.ru/pubs_2007.php (дата обращения: 25.01.2013).
12. Häkli J., Sirkka A., Jaakkola K., Puntanen V., Nummila K., Challenges and Possibilities of RFID in the Forest Industry // Electrical and Electronic Engineering. «Radio Frequency Identification from System to Applications», book edited by Mamun Bin Ibne Reaz, Published: June 5, 2013. URL: <https://www.intechopen.com/books/radio-frequency-identification-from-system-to-applications/challenges-and-possibilities-of-rfid-in-the-forest-industry> (дата обращения: 11.11.2017).
13. Korten S., Kaul C. Application of RFID (radio frequency identification) in the timber supply chain // Croatian Journal of Forest Engineering. 2008. Vol. 29, No 1. Pp. 85–94.
14. Häkli J., Jaakkola K., Pursula P., Huusko M., Nummila K. UHF RFID Based Tracking of Logs in the Forest Industry // 2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010). Orlando, FL, USA, 14–16 April 2010. Pp. 245–251. URL: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/UHF_RFID_IEEE_RFID_2010.pdf (дата обращения: 11.11.2017).
15. RFID Chops Timber Costs. Using tags embedded in plastic nails, German forestry company Cambium tracks logs as they move from the forest to the factory. RFID Journal [Электронный ресурс] URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?2220> (дата обращения: 11.01.2016).

16. Санников С.П., Серебренников М.Ю., Серков П.А. Влияние анизотропных характеристик леса на распространение радиочастотного сигнала RFID метки // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: www.science-education.ru/108-8623 (дата обращения: 19.03.2013).

17. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 329 с.

18. Исимару А. Распространение и рассеивание волн в случайно-неоднородных средах. в 2 т. М.: Мир, 1981.

19. Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media. Academic Press, New York, 1978. 272 p.

20. Распространение радиоволн / О.И. Яковлев, В.П. Якубов, В.П. Урядов и др. М.: «Ленандр», 2009. 496 с.

Статья поступила в редакцию 03.02.17.

Информация об авторах

САННИКОВ Сергей Петрович – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – автоматизация производственных процессов и производств, радиочастотный мониторинг леса. Автор 160 публикаций.

ПОБЕДИНСКИЙ Владимир Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры сервиса и технической эксплуатации, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – роторные окорочные станки с автоматическим управлением, нечёткое и имитационное моделирование, техническая эксплуатация транспортных и технологических машин. Автор 210 публикаций.

БОРОДУЛИН Игорь Викторович – аспирант кафедры сервиса и технической эксплуатации, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – мониторинг лесного фонда и транспортировки лесоматериалов. Автор 17 публикаций.

ПОБЕДИНСКИЙ Андрей Анатольевич – соискатель кафедры автоматизации производственных процессов, Уральский государственный лесотехнический университет. Область научных интересов – мониторинг лесного фонда и технология лесозаготовок. Автор 10 публикаций.

UDC 630.52:587/588

DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.48

EXPERIMENTAL STUDY OF CHARACTERISTICS OF A SIGNAL AT THE RADIO-FREQUENCY MONITORING OF FOREST ENVIRONMENT

S. P. Sannikov, V. V. Pobedinskiy, I. V. Borodulin, A. A. Pobedinskiy

Ural State Forest Engineering University,
37, Sibirsky trakt, Ekaterinburg, 620100, Russian Federation
E-mail: ssp-54@mail.ru, pobed@el.ru

Keywords: dielectric capacitivy of forest; forest environment; power loss of the radio signal.

ABSTRACT

Purpose. The problem of the radio frequency monitoring of forest resources was considered. Electric behavior of a stand and forest environment was in primary focus. The **goal** of the research was to develop analytical experimental models of the basic parameters of radio-frequency signal in forest environment, as well as to develop the methods and equipment of the experimental studies to obtain the characteristics of pure even-aged stand, influencing on the loss of powers of radio signal. **Results.** The principles and equipment of the experimental studies, the calculation model for research the radio frequency signal in forest environment, and analytical models of characteristics of a signal in forest environment were elaborated. The study of the influence of forest environment and individual elements of stand on the characteristics of radio-frequency signal was carried out. The processing and analysis of the results of the research were executed. **Discussion.** A notion of complex dielectric capacitivy of forest environment was offered to define the parameters of power loss of electromagnetic waves. The functional dependency of the loss of power, on which the climatic parameters (temperature, moisture of the air and timber) effect, are obtained. **Conclusion.** The equations of dependency of the loss of power of electromagnetic waves on different parameters of pure even-aged stand and on dielectric capacitivy of forest environment were developed on the basis of theoretical and experimental studies.

REFERENCES

1. Hertz E.F., Sannikov S.P., Solovyev V.M. Ispolzovanie radiochastotnykh ustroystv dlya monitoringa ekologicheskoy situatsii v lesakh [Using of Radio-Frequency Devices for Monitoring the Environmental Situation in Forests]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agricultural Vestnik of Ural]. 2012. No 1 (93). P. 37-39.
2. Hertz E.F., Sannikov S.P. Metodika provedeniya monitoringa dvizheniya syrevykh potokov v lesopromyshlennom proizvodstve na osnove RFID-tekhologii [Methodology of Monitoring of Movement of Raw Timber on the Basis of RFID-Technology]. *Formirovanie regionalnogo lesnogo klastera: sotsialno-ekonomicheskie i ekologicheskie problemy i perspektivy lesnogo kompleksa. Mater. VIII mezhdunar. nauch.-tekh. konf.* [Development of Regional Forest Cluster: Socio-Economic and Ecological Problems and Prospects of Forest Complex. Proceeding of VIII International Scientific and Engineering Conference]. Ekaterinburg: UGLTU, 2011. P. 354-358.
3. Sannikov S. P., Herz E. F., Dyachkova A. A. Metodologiya distantsionnogo monitoringa drevostoev i transportnykh potokov drevesiny [Methodology for Remote Monitoring of Stands and Transport Flows of Timber]. *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal]. 2016. P. 109-115. URL: <http://narfu.ru/university/library/books/2780.pdf> (Reference date: 23.11.2016).
4. Dyachkova A. A., Serkov P. A. Radiochastotnaya tomografiya. Modelirovanie sistemy monitoringa lesa predlozhennym metodom. [Radio Frequency Tomography. Simulation of a System of Forest Monitoring with the Proposed Method]. *Puti nauki* [The Ways of Science]. 2015. No 3(13). P. 31–33.
5. Kanso M. A., Rabbat M.G. Compressed RF Tomography for Wireless Sensor Networks: Centralized and Decentralized Approaches, in Proc. IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, Marina Del Rey, June, 2009. 67 p.
6. Rafikov S. A., Sannikov S. P. Izmerenie kharakteristik dereva na osnove mekhanicheskikh kolebaniy ego stvola [Measuring of the Characteristics of Wood Based on the Mechanical Vibrations of Its Stem]. *Nauchnoe tvorchestvo molodezhi – lesnomu kompleksu Rossii. Materialy XI Vserossiyskoy nauch.-tekh. konf. Ch.1.* [Scientific Creativity of the Youth for the Forestry Complex of Russia. Proceedings of XI All-Russian Scientific and Technical Conference. Part 1]. Ekaterinburg: UGLTU, 2015. P. 20-23.
7. Bychkov D.M., Gavrilenko A.S., Egorova L.A., et al. Distantsionnye issledovaniya rastitelnykh pokrovov i lesov radiolokatsionnymi metodami [Remote Study of Vegetation and Forests by Radar Methods]. *Materialy Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii "SVCh-tehnika i telekommunikatsionnye tekhnologii"* [Proceedings of the International Crime-
- an Conference "Microwave Equipment and Telecommunication Technologies"]. Kharkov. 2003. URL: <http://nauchebe.net/2012/07/distancionnye-issledovaniya-rastitelnykh-pokrovov-i-lesov-radiolokatsionnymi-metodami/> (Reference date: 23.11.2016).
8. Lang R.H., Shneider A., Altman F.J. Scatter Model for Pulsed Radio Transmission through Forests. MILCOM'83: Proc. IEEE Milit. Commun. Conf., Washington, D.C., 1983, Vol. 2. New York, 1983. P. 433-437.
9. Lang R.H., Schneider A., Diaz R. L-band Attenuation in a Trunk-Dominated Forest. IGARSS'87: Int. Geosci. and Remote Sens. Symp., Ann Arbor, Mich., 1987, Vol. 2. New York, 1987. P. 821-826.
10. Akhiyarov V.V. Rasseyaniye na statisticheski nerovnoy poverhnosti s proizvolnymi korrelyatsionnymi svoystvami [Scattering by a Statistically Rough Surface with Arbitrary Correlation Properties]. *Zurnal radioelektroniki* [Radio Electronics Magazine]. No 2, 2012. URL: <http://jre.cplire.ru/win/feb12/2/text.html> (Reference date 25.01.2013).
11. Geltser A. A., Voroshilin E.P., Ilchenko V.P. Model kanala rasprostraneniya radiovoln s odnokratnym rasseyaniem v diapazone UKV [Channel Propagation Model with a Single Scattering in the VHF Range]. Tomsk TGUSU i R. 2007. URL: http://www.conf-ulstu.ru/pubs_2007.php (Reference date: 25.01.2013).
12. Häkli J., Sirkka A., Jaakkola K., Puntanen V., Nummila K., Challenges and Possibilities of RFID in the Forest Industry. Electrical and Electronic Engineering. Radio Frequency Identification from System to Applications", book edited by Mamun Bin Ibne Reaz, Published: June 5, 2013. URL: <https://www.intechopen.com/books/radio-frequency-identification-from-system-to-applications/challenges-and-possibilities-of-rfid-in-the-forest-industry> (Reference date: 11.11.2017).
13. Korten S., Kaul C. Application of RFID (Radio Frequency Identification) in the Timber Supply Chain. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 2008. Vol. 29, No 1. P. 85-94.
14. Häkli J., Jaakkola K., Pursula P., Huusko M., Nummila K. UHF RFID Based Tracking of Logs in the Forest Industry. 2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010). Orlando, FL, USA, 14-16 April 2010. Pp. 245-251. URL: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/UHF_RFID_IEEE_RFID_2010.pdf (Reference date: 11.01.2016).
15. RFID Chops Timber Costs. Using Tags Embedded in Plastic Nails. German Forestry Company Cambium Tracks Logs as They Move from the Forest to the Factory. *RFID Journal*. URL: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?2220> (Reference date: 11.11.2017).

16. Sannikov S.P., Serebrennikov M.Yu., Serkov P.A. Vliyanie anizotropnykh kharakteristik lesa na rasprostranenie radiochastotnogo signala RFID metki [Influence of Anisotropic Characteristics of Forest on the Distribution of Radio-Frequency RFID Tags]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2013. No 2; URL: www.science-education.ru/108-8623 (Reference date: 19.03.2013).

17. Tikhonov A. N., Arsenin V. Ya. Metody resheniya nekorrektnykh zadach [Methods for Solving the Ill-Posed Problems]. Moscow: Nauka, 1979. 329 p.

18. Ishimaru A. Rasprostranenie i rasseivanie voln v sluchayno-neodnorodnykh sredakh. V 2kh tomakh. [Distribution and Dispersion of Waves in Random Media. In 2 volumes]. Moscow: Mir, 1981.

19. Ishimaru A. Wave Propagation and Scattering in Random Media. Academic Press, New York, 1978. 272 p.

20. Yakovlev O.I., Yakubov V.P., Uryadov V.P., Paveliev A.G. *Rasprostranenie radiovoln* [Propagation of radio waves]. Moscow: «Leandr», 2009. 496 p.

The article was received 03.02.17.

For citation: Sannikov S. P., Pobedinskiy V. V., Borodulin I. V., Pobedinskiy A. A. Experimental Study of Characteristics of a Signal at the Radio-Frequency Monitoring of Forest Environment. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management.* 2017. No 4(36). Pp. 48–58. DOI: 10.15350/2306-2827.2017.4.48

Information about the authors

SANNIKOV Sergey Petrovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Chair of the Automations of Production Processes, Ural State Forest Engineering University. Research interests – automation of production processes and production, radio-frequency monitoring of forest. The author of 160 publications.

POBEDINSKIY Vladimir Victorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Chair of Service and Maintenance, Ural State Forest Engineering University. Research interests – cambium-shear debarkers automatically controlled, fussy and simulation modeling, technological usage of transport and technological machines. The author of 210 publications.

BORODULIN Igor Victorovich – Postgraduate student at the Chair of Service and Technical Usage, Ural State Forest Engineering University. Research interests – monitoring of timber fund and timber transportation. The author of 17 publications.

POBEDINSKIY Andrey Anatolyevich – degree seeing applicant at the Chair of Automation of Production Processes, Ural State Forest Engineering University. Research interests – monitoring of timber fund and logging method. The author of 10 publications.