

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

МОДЕЛЬ РАССЕЙВАНИЯ РАДИОВОЛН В ЛЕСНОЙ СРЕДЕ

S. P. Sannikov, V. V. Pobedinsky, A. A. Pobedinskiy

MODEL SCATTERING OF RADIO WAVES IN A FOREST

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Объектом исследования являлись участки лесной среды с различными лесонасаждениями. Предметом исследований являлись закономерности изменения величины рассеяния радиоволн в процессе радиочастотного мониторинга леса в зависимости от характеристик лесной среды, конструктивных параметров аппаратуры, параметров электромагнитного излучения и климатических условий. Цель работы заключалась в разработке модели рассеивания радиоволн в лесной среде. **Материалы и методы.** Для проведения исследований в качестве научных методов использованы методы математического моделирования, теории информации и передачи сигналов, методы расчета электромагнитных полей в лесных массивах, теория эксперимента, математической статистики. Для экспериментов были разработаны методики и оборудование для лабораторных и экспериментальных исследований, которое включает датчики (метки) RFID, передатчик, антенны трех типов, приемник, компьютер и специально разработанное программное обеспечение для обработки принимаемой информации. **Результаты.** Результатами являются предложенные расчетная модель распространения прямой волны в лесной среде, геометрическая расчетная модель распространения луча радиоволны в лесу и модель рассеивания радиоволн в лесной среде. Полученные результаты необходимы для проектирования систем радиочастотного мониторинга лесного фонда. **Выводы.** Полученная модель рассеивания радиоволн в лесной среде учитывает все основные влияющие параметры, дает достаточно точные результаты, адекватность модели подтверждена результатами экспериментальных исследований, поэтому результаты могут быть рекомендованы для использования при проектировании систем радиочастотного мониторинга леса.

A b s t r a c t. Background. The subject of the study were sections of the forest environment with different forest plantations. The subject of the research were the regularities of the change in the magnitude of the scattering of radio waves in the process of radio frequency monitoring of the forest, depending on the characteristics of the forest environment, the design parameters of the equipment, the parameters of electromagnetic radiation and climatic conditions. The aim of the work was to develop a model for scattering radio waves in the forest environment. **Materials and methods.** To conduct research as scientific methods, mathematical modeling methods, information theory and signal transmission, methods for calculating electromagnetic fields in forest areas, theory of experiment, mathematical statistics were used. For the experiments, techniques and equipment for laboratory and experimental studies were developed that includes RFID sensors, transmitters, three types of antennas, a receiver, a computer and specially developed software for processing received information. **Results.** The results are the proposed design model for propagation of a direct wave in a forest environment, a geometric design model for the propagation of a radio wave beam in a forest, and a model for dispersing radio waves in a forest environment. The obtained results are necessary for the design of radio-frequency monitoring systems of the forest fund. **Conclusions.** The received model of radio wave scattering in the forest environment takes into account all the main influencing param-

ters, gives fairly accurate results, the adequacy of the model is confirmed by the results of experimental studies, therefore the results can be recommended for use in the design of radio frequency monitoring systems of the forest.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радиочастотный мониторинг лесного фонда; рассеивание радиоволн в лесной среде; комплексная диэлектрическая проницаемость участка леса; параметры лесной среды.

К e y w o r d s: radio frequency monitoring the timber fund; the diffusing radio waves in timber ambience; complex dielectric constant of the forest area; parameters of the timber ambience.

Введение

В настоящее время для решения глобальной проблемы сохранения лесов приняты соответствующие программные документы на государственном уровне, в том числе «Основы государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года», которые предусматривают создание новых дистанционных систем наземного, авиационного и космического мониторинга пожарной опасности, защиты от незаконных рубок и использование инновационных информационных технологий. Разработанная [1, 2] с этой целью принципиально новая система (рис. 1) в виде сети устройств для непрерывного радиочастотного мониторинга лесного фонда в качестве одной из исходных величин использует значение рассеивания радиоволн в лесной среде. В наиболее подробных по этой теме исследованиях [3] указанный параметр получен на моделях деревьев с абсолютно гладкой поверхностью, геометрически правильной цилиндрической формы и равномерно распределенных по площади. Такая идеализация может давать значительные погрешности работы и приводить к функциональной непригодности всей системы радиочастотного мониторинга, которая должна учитывать перемещение лесоматериалов в лесу с точностью до одного бревна.

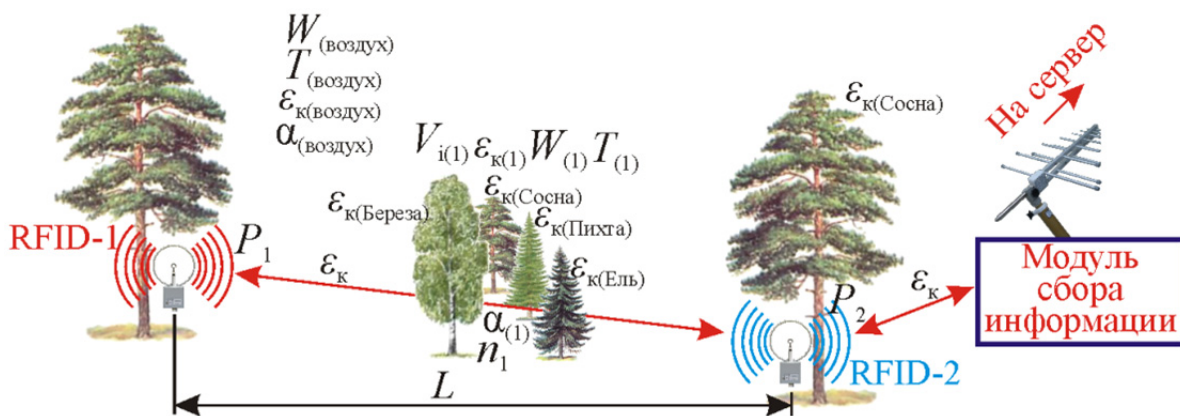


Рис. 1. Схема сети радиочастотного мониторинга лесного фонда:

RFID-1 – RFID-4 – датчики; P – мощность сигнала; W – влажность; T – температура; n – количество деревьев; L – расстояние между датчиками; V_i – объемная доля i -го компонента лесной среды; α – константа вида лесного массива; ϵ_k – комплексная диэлектрическая проницаемость

Таким образом, определилась **цель** настоящих исследований, которая заключалась в разработке модели рассеивания радиоволн в лесной среде.

Для достижения цели решались следующие **задачи**:

- обоснование перечня параметров, необходимых для создания адекватной модели;
- разработка геометрической расчетной модели распространения луча радиоволны в лесу;
- разработка математической модели в общем виде рассеивания радиоволн в лесной среде;

– разработка методики и аппаратуры для экспериментальных исследований процессов радиочастотного мониторинга лесной среды;

– выполнение натуральных экспериментальных исследований в лесной среде и оценка адекватности теоретической модели.

Для проведения исследований в качестве научных методов использованы методы математического моделирования, теории информации и передачи сигналов, методы расчета электромагнитных полей в лесных массивах, теория эксперимента, математической статистики.

Расчетная схема представлена на рис. 2, где на среднее поле прямой волны влияют диаметры стволов деревьев d , диэлектрическая проницаемость древесины ϵ_d и остальных элементов лесной среды, хвои, листьев, воздушного пространства вокруг деревьев, поэтому в расчетах будем использовать усредненные значения параметров растительности:

- диаметр ствола деревьев d ;
- высота деревьев h ;
- расстояние источника электромагнитных волн до точки измерения поля, т.е. приемной антенны ресивера l ;
- длина волны λ ;
- амплитуда энергии источника электромагнитных волн U или вектор рассеяния поля бесконечным цилиндром $U(x)$;
- электрическая проводимость древесины σ ;
- диэлектрическая проницаемость среды и древесины ϵ ;
- распространение электромагнитной волны происходит в лесной среде со средней постоянной густотой деревьев G .

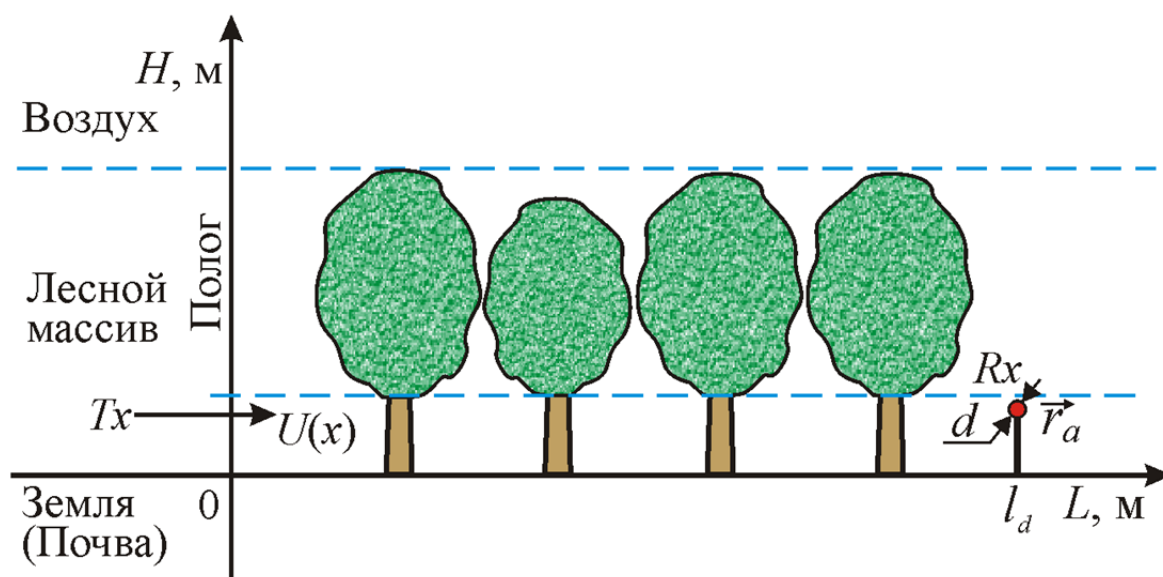


Рис. 2. Расчетная модель распространения прямой волны в лесной среде: H, L – координаты модели (высота, расстояние); Tx, Rx – передатчик, приемник; $U(x)$ – энергия источника электромагнитных волн, которая ослабляется на пути L ; l_d – координата приемной антенны с диаметром d ; \vec{r}_a – энергии электромагнитной волны в точке приема l_d

Деревья на трассе распространения потока электромагнитной волны располагаются дискретно и случайным образом, а общую среднюю густоту деревьев G можно подсчитать по формуле

$$G = \frac{10^4 N_i}{s}, \text{ шт./га}, \quad (1)$$

где N_i – количество деревьев на трассе распространения потока электромагнитной волны, шт.; s – площадь вдоль трассы распространения потока электромагнитной волны с шириной 1 м, м².

Приведенные параметры рассматриваются в работе [3] на моделях деревьев с абсолютно гладкой поверхностью цилиндрической формы и распределенных на модельной территории равномерно.

Для получения зависимости для реальных условий введем понятие комплексной диэлектрической проницаемости лесной среды $\epsilon^* = f(\epsilon_d, \epsilon_l, \epsilon_x, \epsilon_k, \epsilon_t, \epsilon_z, \epsilon_v)$. Здесь индексы при переменных ϵ указывают на принадлежность к следующим элементам лесной среды:

- д – древесине ствола дерева;
- л – листьям;
- х – хвое;
- к – кроне деревьев и кустов;
- т – траве;
- з – земле (почве);
- в – воздуху.

Среднее поле рассеивания электромагнитных волн в лесной среде $W(\vec{l}_d)$, где деревья представляют собой объекты со случайным расположением и случайной неоднородностью, зависит от множества параметров, влияющих на когерентность прямой волны $I(\vec{l}_d)$. Рассеивание волн в такой случайной дискретной лесной среде подробно исследовано А. Исимару [4], но имеются ограничения, которые в нашем случае являются недостатками. Так, при рассмотрении автор использовал модели в виде плоских прямоугольных поверхностей, которые не сочетаются с формой стволов деревьев. Автор использовал обозначение функции $\vec{r}_a(x_a)$ энергии электромагнитной волны в точке приема a на радиусе распространения волны. Напряженность электромагнитного поля ультракоротких волн (УКВ) в точке приема зависит от протяженности l с встречающимися элементами на пути с диаметром d . Отсюда следует, что функция $\vec{r}_a(x_a)$ в произвольной точке приема a связана с величиной рассеивания радиоволн $W(\vec{l}_d)$ на протяженности l_d до приемной антенны в лесу с определенным количеством деревьев на пути, определяемым плотностью деревьев G (1):

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

Тогда для вывода уравнения расчета потенциала $U(\vec{r}_a)$ [В, Вт, дБм] электромагнитной волны в точке a на пути распространения радиосигнала в лесном массиве применим теорию многократного рассеивания радиоволн [4]:

$$U(\vec{r}_a) = \sum_{s=1}^N E(\Psi_i^s), \quad (3)$$

где E – величина напряженности электромагнитного поля в направлении \vec{r}_a на пути распространения [В, Вт, дБм]; Ψ_i^s – параметр, влияющий на прохождение радиоволн в массиве лесной среды определенным индексом дерева s , для i -го измерения.

Параметр Ψ_i^s имеет прямую зависимость с протяженностью канала передачи данных.

С учетом вышесказанного модель в общем виде величины рассеивания радиоволн $W(\vec{l}_d)$ в лесной среде выглядит так:

$$W(\vec{l}) = \left[kl \left(\langle E, J, S, \sigma, \epsilon^*, G \rangle \right) \right], \quad (4)$$

где k – волновое число среды, m^{-1} ; l – протяженность от источника радиоволны до точки наблюдения, м; J – плотность тока в антенне, A/m^2 ; S – площадь поперечного сечения дерева, m^2 ; ϵ^* – комплексная диэлектрическая проницаемость среды, Φ/m ; G – плотность деревьев в лесной среде, шт./ m^2 ; σ – удельная проводимость среды (волновое сопротивление), Cm/m .

Известно, что радиоволны распространяются равномерно во всех направлениях от источника сигнала. Для определения величины рассеивания радиоволн $W(\vec{l}_d)$ на протяженности l_d в точке a расположения приемной антенны в лесу рассмотрим один луч в направлении антенны ресивера r_a , который выразим в векторной форме с углом раствора α . Для исследования

этого вопроса разработана геометрическая расчетная модель распространения луча радиоволны в лесу, ее графическое представление показано на рис. 3.

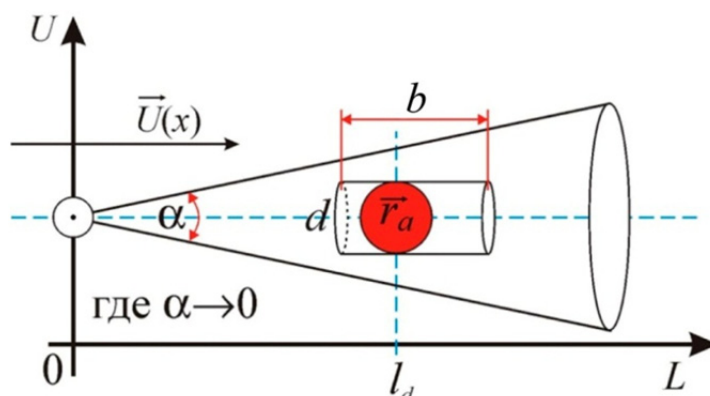


Рис. 3. Геометрическая расчетная модель распространения луча радиоволны в лесу: U , $U(x)$ – энергия источника электромагнитных радиоволн и вектор ее распространения; \vec{r}_a – радиус-вектор расстояния до антенны ресивера (приемника); d – размер антенны; l_d – координата приемной антенны; L – протяженность распространения радиоволн; b – длина антенны; α – угол раствора луча
где $\alpha \rightarrow 0$

Размер d антенны ресивера (приемника) r_a выбирается кратным длине волны в сторону увеличения и в сторону уменьшения, например: 2λ ; λ ; $1/2\lambda$; $1/4\lambda$, и т.д. Тогда плотность энергии радиоволн в точке приемной антенны ресивера с координатой l_d зависит от волнового числа среды k и площади антенны S :

$$S = wG = EH, \quad (5)$$

где w – плотность энергии электромагнитной волны, которая зависит от электрического и магнитного поля $w = w_e + w_m$; E , H – электрическое и магнитное поле электромагнитной волны; G – коэффициент пропорциональности, густота деревьев в лесной среде.

Вектор плотности потока электромагнитной энергии радиоволны принято называть вектором Умова – Пойнтинга [5], и с его учетом формула (5) записывается в следующем виде:

$$\vec{S} = [\vec{E}, \vec{H}], \quad (6)$$

или в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div} \vec{S} = 0. \quad (7)$$

Из курса физики известно, что электрическое w_e и магнитное w_m поля связаны между собой и распространяются в противоположных плоскостях, зависят от электрической ϵ и магнитной μ проницаемости среды. Тогда запишем общую плотность энергии электромагнитной волны с учетом сказанного:

$$w = w_e + w_m = (\epsilon_0 \epsilon E^2)/2 + (\mu_0 \mu H^2)/2, \quad (8)$$

где индекс 0 означает начальную проницаемость.

Частота электромагнитных волн в экспериментах по настоящей работе была принята 0,9 и 2,4 ГГц. Поскольку длина волны составляет несколько десятков миллиметров (точнее 330 и 135 мм соответственно), а расстояния до объекта наблюдения от источника сигнала больше 1 м, то магнитной проницаемостью в дальнейшем можно пренебречь в силу ее ничтожно малой величины.

Из уравнения (8) можно предположить, что энергия распространения электромагнитной энергии зависит от проводимости лесной среды. С другой стороны, лес является неоднородной анизотропной средой с хаотично расположенными элементами лесной среды, их размеры по-разному влияют на распространение радиоволн.

Для учета этих факторов введем понятие комплексной проницаемости и проводимости леса. Тогда для расчета эффективной проводимости леса σ_3 на участке от передатчика до приемника можно получить выражение

$$\sigma_3 = \sum_i^n \sigma_i, \quad (9)$$

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

Под элементами лесной среды, которые влияют на распространение электромагнитной энергии от передатчика, будем понимать:

- стволы деревьев;
- ветки деревьев и кустарников;
- листья;
- траву;
- крону деревьев как интегрированный элемент дерева;
- воздушное пространство в лесу.

Все перечисленные элементы лесной среды имеют объем со свойствами, влияющими на распространение радиоволны. Для каждого из элементов лесной среды значения можно усреднить и измерить отдельно, например в лаборатории. По данным [5], высокочастотная энергия электромагнитных волн распространяется по поверхности материального тела. В данном случае все элементы леса являются отдельно расположенными в пространстве, имеют различные размеры, и можно сделать вывод, что они дискретны. Для простоты объяснения примем воздушное пространство в лесу как сплошную среду. Эффективная проводимость леса является комплексной величиной, поэтому по правилу амплитуд в математике запишем выражение для ее расчета:

$$\sigma_3 = \sigma' + i\sigma'', \quad (10)$$

где σ' , σ'' – действительная и мнимая части комплексного числа; i – мнимая единица, равная $\sqrt{-1}$.

Рассмотрим среду распространения электромагнитной волны (рис. 2) с условной электрической проводимостью $\sigma = 0$. Пусть распространяется электромагнитная волна в направлении, задаваемом единичным вектором \vec{m} . Тогда можно записать волновое уравнение в одномерном пространстве $x = \vec{m}\vec{r}$, которое является произведением единичного вектора \vec{m} и радиус-вектора расстояния до точки наблюдения \vec{r} для сферического распространения электромагнитных волн [5]:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{c^2}{\epsilon\mu} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2}, \quad (11)$$

где \vec{E} – вектор напряженности электромагнитного поля в лесной среде; c – скорость света; ϵ , μ – диэлектрическая и магнитная проницаемости лесной среды; x – координата в направлении распространения электромагнитной энергии.

Уравнение (11) описывает две волны в направлении $\pm \vec{m}$ с некоторой фазовой скоростью $v = \omega/k$:

$$\frac{c^2}{\epsilon\mu} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}} = v. \quad (12)$$

Тогда покажем напряженность электромагнитного поля для скалярного (круглые скобки) и векторного (квадратные скобки) произведения членов волнового уравнения:

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{E} &= \frac{\partial}{\partial x} (\vec{m} \vec{E}), \\ \text{rot} \vec{E} &= \frac{\partial}{\partial x} [\vec{m} \vec{E}]. \end{aligned} \quad (13)$$

Воспользуемся уравнением Максвелла с нулевой проводимостью в векторной форме [6]:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}(\vec{m}\vec{E}) = -\mu_0\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial x}(\vec{m}\vec{H}) = -\varepsilon_0\varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \\ \frac{\partial}{\partial x}[\vec{m}\vec{E}] = 0, \\ \frac{\partial}{\partial x}[\vec{m}\vec{H}] = 0. \end{cases} \quad (14)$$

После совместного решения уравнений (14) и (11) получим связь между полями в электромагнитной волне:

$$\vec{E} = -\sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}}[\vec{m}\vec{H}]. \quad (15)$$

Отношение магнитной проницаемости к диэлектрической проницаемости обозначим символом $Z = \sqrt{\frac{\mu_0\mu}{\varepsilon_0\varepsilon}}$ и назовем волновым сопротивлением лесной среды [5]. Величина Z указывает на характеристику среды, которая состоит из двух частей. Соответственно отношение $\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ – это волновое сопротивление свободного пространства, а отношение $\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ – волновое сопротивление среды, в которой распространяется радиоволна.

Перепишем уравнение (15) для гармонически меняющейся энергии поля в лесу в любой ее точке:

$$E(x, t) = E_0(x) \exp(-i\omega t), \quad (16)$$

где x, t – координата и время; ω – круговая частота.

Из уравнения (16) видно, что энергия поля меняется от положения координаты, времени и частоты [7].

Теперь для уравнения (11) избавимся от производных по времени. С этой целью для решения уравнения Гельмгольца воспользуемся методикой, предложенной В. Б. Ивановым [5]. Условие решения уравнения с гармонической зависимостью от начальной пространственной координаты $E_0 \sim \exp(ikx)$ определяется выражением

$$\frac{d^2\vec{E}}{dx^2} = \frac{c^2}{\varepsilon\mu} \frac{d^2\vec{E}}{dt^2}, \quad (17)$$

или после соответствующих преобразований [5]:

$$\frac{d^2\vec{E}}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} \right) \mu E_0 = 0. \quad (18)$$

Из уравнения (18) получим дисперсионное соотношение с учетом характеристики лесной среды, называемое в теории волн волновым числом среды [5]:

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \left(\varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0\omega} \right) \mu = \frac{\omega^2}{c^2} \mu \varepsilon^*. \quad (19)$$

Здесь проводимость тождественна эффективной проводимости лесной среды (10), или $\sigma_3 \equiv \sigma$, и является комплексной величиной, тогда и диэлектрическая проницаемость лесной среды становится комплексной благодаря проводимости:

$$\varepsilon + i \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \omega} = \varepsilon^*, \quad (20)$$

которую по закону амплитуд можно записать в следующем виде:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon''. \quad (21)$$

С учетом вышеизложенного анализа распространения электромагнитных волн в лесной среде, где на ее параметры влияют физические свойства, такие как проводимость, диэлектрическая проницаемость, рассмотренные в формулах (6)–(21), перепишем формулу через волновое уравнение (1):

$$G = k\varepsilon\mu \cdot t(E), \quad (22)$$

где t – тензор поля распространения электромагнитной энергии во времени.

Вернемся к выражению (4), которое перепишем с учетом уравнений (5), (19), (21) и модели распространения луча (рис. 3) и получим следующее соотношение для расчета величины рассеивания радиоволн в отдельно взятой точке лесной среды:

$$W(x) = \exp\left[ikx(1 + GS_a(\varepsilon - 1))\right], \quad (23)$$

где k – волновое число среды (определено выше); x – координата расположения приемного устройства; G – коэффициент пропорциональности, густота деревьев в лесной среде; S_a – площадь лесной среды, занимаемая антенной T_x или R_x ; ε – диэлектрическая проницаемость среды.

Перепишем уравнение (23) для лесной среды с учетом модели распространения луча (рис. 3), заменив координату a расстоянием от источника сигнала до приемника, а также перейдя от площади антенны к ее диаметру и получим модель рассеивания радиоволн в лесной среде в общем виде:

$$W(\vec{l}_d) = \exp\left[ikl_d\left(1 + \frac{G\pi d^2}{4}(\varepsilon^* - 1)\right)\right], \quad (24)$$

где l – протяженность от источника радиоволны до точки измерения; d – диаметр антенны (луча электромагнитных волн); ε^* – комплексная диэлектрическая проницаемость лесной среды в точке приема сигнала.

Для подтверждения адекватности модели проведены экспериментальные исследования радиочастотного мониторинга лесной среды. Разработанный экспериментальный комплекс изображен на рис. 4. Фрагменты проведения экспериментальных исследований показаны на рис. 5. Результаты эксперимента показаны на рис. 6.

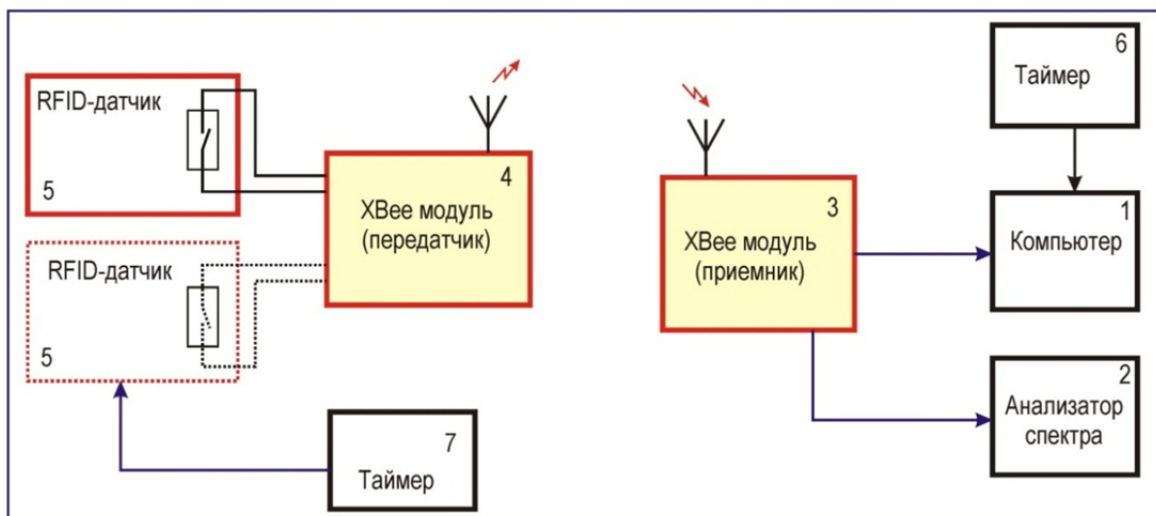


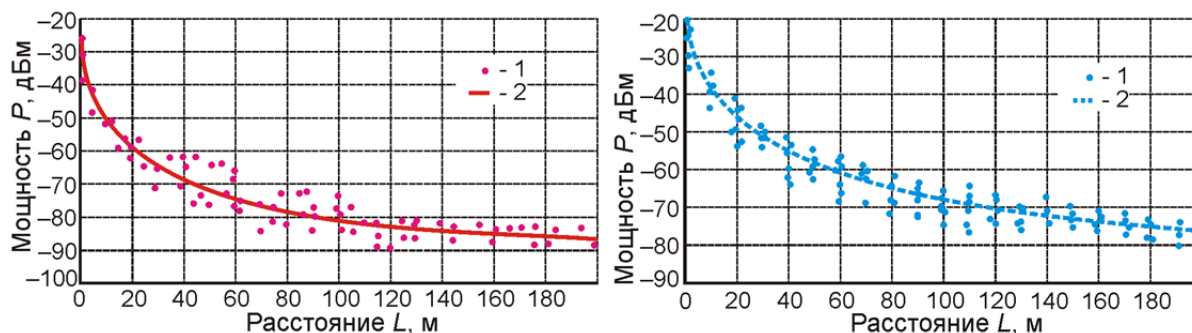
Рис. 4. Структурная схема установки сети беспроводных RFID-устройств:
1 – компьютер; 2 – анализатор спектра; 3 – XВее модуль (приемник);
4 – XВее-модуль (передатчик); 5 – RFID-датчик; 6, 7 – таймер



а)

б)

Рис. 5. Выполнение экспериментальных исследований:
а – установка датчиков; б – установка приемника



а)

б)

Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований:
а – рассеивание радиоволн в сосновом лесу; б – рассеивание радиоволн в березовом лесу;
1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость

Заключение

Подытоживая сказанное, можно заключить, что предложенная модель учитывает все основные параметры лесной среды, конструкции радиочастотных устройств, климатические факторы и является достаточно адекватной, что подтверждено результатами, полученными экспериментально.

Библиографический список

1. Зависимость падения мощности сигнала от параметров лесной среды при радиочастотном мониторинге лесного фонда / С. П. Санников, В. В. Побединский, И. В. Бородулин, М. А. Черницын, Н. С. Кузьминов // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – № 4. – С. 181–187.
2. Пат. 2492891 Российская Федерация, МПК А62С 37/00 С1. Система обнаружения лесного пожара / Лисиенко В. Г., Санников С. П.; заявитель и патентообладатель Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т. – № 2012117204/12; заявл. 26.04.2012; опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26. – 3 с.
3. Магазинникова, А. Л. Статистические методы расчета УКВ полей в лесных районах: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03 / Магазинникова А. Л. – Томск, 1998. – 23 с.
4. Исимару, А. Распространение и рассеивание волн в случайно-неоднородных средах: в 2 т. / А. Исимару. – М.: Мир, 1981.

5. Иванов, В. Б. Теория волн : курс лекций / В. Б. Иванов. – Иркутск : Иркут. ун-т, 2006. – С. 76.
6. Лавров, В. М. Теория электромагнитного поля и основы распространения радиоволн / В. М. Лавров ; под ред. И. Г. Кляцкина. – М. : Связь, 1964. – 368 с.
7. Яковлев, О. И. Распространение радиоволн : учебник / О. И. Яковлев, В. П. Якубов, В. П. Урядов, А. Г. Павельев ; под ред. О. И. Яковлева. – М : ЛеНАНД, 2009. – 496 с.

Санников Сергей Петрович

кандидат технических наук, доцент,
кафедра автоматизации
производственных процессов,
Уральский государственный
лесотехнический университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37)
E-mail: ssp-54@mail.ru

Sannikov Sergey Petrovich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of automation
of production processes,
Ural State Forestry Technical University
(37 Sibirskiy trakt street, Ekaterinburg, Russia)

Побединский Владимир Викторович

доктор технических наук, профессор,
кафедра сервиса и технической эксплуатации,
Уральский государственный
лесотехнический университет
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37)
E-mail: pobed@e1.ru

Pobedinskiy Vladimir Viktorovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of service and technical operation,
Ural State Forestry Technical University
(37 Sibirskiy trakt street, Ekaterinburg, Russia)

Побединский Андрей Анатольевич

соискатель,
кафедра автоматизации
производственных процессов,
Уральский государственный
лесотехнический университета
(Россия, г. Екатеринбург, ул. Сибирский тракт, 37)
E-mail: pobed@e1.ru

Pobedinskiy Andrey Anatol'evich

applicant,
sub-department of automation production processes,
Ural State Forestry Technical University
(37 Sibirskiy trakt street, Ekaterinburg, Russia)

УДК 630.52:587/588

Санников, С. П.

Модель рассеивания радиоволн в лесной среде / С. П. Санников, В. В. Побединский, А. А. Побединский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 39–48.
DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-6.