

Краткие сообщения

01

Частотные и пространственные характеристики электрофизических параметров ствола живого дерева

© В.К. Балханов, В.Р. Адвокатов, Ю.Б. Башкуев

Бурятский Научный центр СО РАН,
670047 Улан-Удэ, Россия
e-mail: ballar@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 13 февраля 2009 г.)

Методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) измерена пространственная характеристика удельного сопротивления ρ ствола живой сосны на постоянном токе: $\rho \sim L^{-0.85}$ и частотная характеристика сопротивления R этого же ствола сосны на переменном токе: $R \sim f^{-0.053}$. Результаты смоделированы методами фрактальной геометрии, согласно которым $\rho \sim L^{-h+2}$ и $R \sim f^{-\frac{3}{h}+1}$, где h — размерность блуждания электрического тока в стволе дерева. Из сравнения экспериментальных и теоретических результатов следует, что $h = 2.85$ и фрактальная размерность $D = 1/h = 0.35$. Поскольку $D < 1$, то проводящие участки образуют канторовское множество.

Введение

Древесина живого дерева представляет собой физический объект, состоящий из чередующихся колец с постоянно протекающими в них физико-химическими и биологическими процессами. В первом приближении можно принять, что ствол древесины состоит из концентрических диэлектрических цилиндров, между которыми в обоих направлениях течет проводящая минерализованная жидкость. При увеличении масштаба разрешения как диэлектрические, так и проводящие слои разделяются на такие же, но более тонкие, диэлектрические и проводящие прослойки. Можно принять, что разделение древесины на диэлектрические и проводящие слои носит масштабный характер — при разных увеличениях характер распределения слоев в статистическом смысле самоподобен. Такое рассмотрение позволяет для описания электрических характеристик древесины — диэлектрической проницаемости и проводимости — привлечь методы фрактальной геометрии. Это возможно в силу того, что фрактальная геометрия определяется масштабностью и самоподобием [1,2]. Поскольку различные проводящие слои пространственно разделены, то они образуют канторовское множество, которое описывается фрактальной размерностью D . Для непрерывной фрактальной линии $D > 1$. Если фрактальная линия не сплошная, а состоит из чередующихся отрезков, то для нее $D < 1$.

Многомасштабность и самоподобие проводящих участков древесины, согласно методологии фрактальной геометрии, приводят к тому, что удельное сопротивление ρ и сопротивление R должны иметь степенную зависимость от частоты f внешнего электрического поля и длины пути L этого тока в древесине. Рассмотрим результаты измерения зависимости ρ от L и R —

от f и проведем моделирование результатов измерения фрактальной геометрии. Все измерения проводились на одном стволе живого соснового дерева радиусом 11.7 см в летнее время. Схема измерения приведена на рис. 1.

Измерение методом вертикального электрического зондирования

Метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) широко используется в электроразведке для определения пространственного распределения удельного сопротивления исследуемой геологической среды [3]. Применительно к древесине этот метод описан в [4],

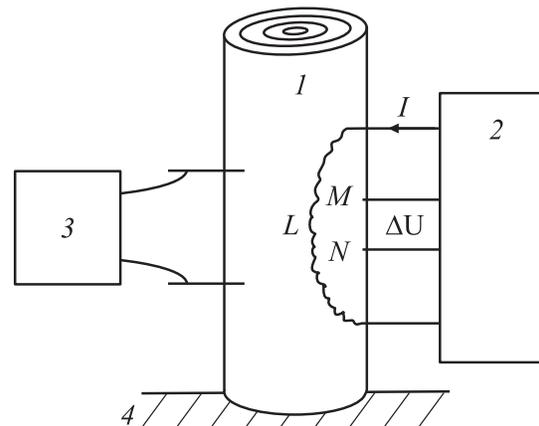


Рис. 1. Схема измерения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) удельного сопротивления и на переменном токе сопротивления ствола живого дерева: 1 — ствол древесины, 2 — установка ВЭЗ типа АЭ-72, 3 — RLC-метр АМ-3003, 4 — грунт.

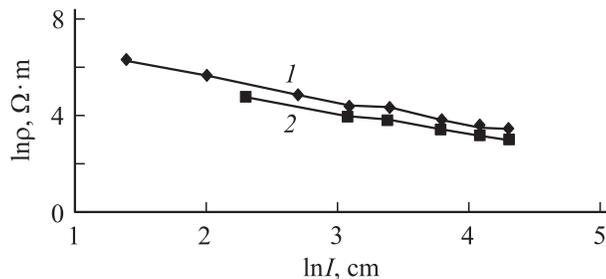


Рис. 2. Пространственная характеристика удельного сопротивления ρ ствола живой сосны радиусом 11.7 см, измеренная методом ВЭЗ: $\rho \sim L^{-0.85}$; 1 — расстояние между приемными электродами $MN = 2.5$ см, 2 — $MN = 10$ см.

ему авторы и следовали при обработке результатов измерения.

На уровне человеческого роста в ствол сосны по высоте вводились два электрода, находящиеся на расстоянии L друг от друга, по которым в древесину подавался постоянный ток I . Симметрично от питающих электродов с двух других электродов, находящихся на расстоянии $MN = 2.5$ и 10 см друг от друга, снималось напряжение ΔU . Зная питающий ток I , снимаемое напряжение ΔU , а также радиус ствола древесины r , согласно [4], можно рассчитать удельное сопротивление ρ :

$$\rho = \frac{\pi r^2}{MN} \frac{\Delta U}{I}.$$

В ходе измерений установлено, что значение ρ зависит от расстояния L между электродами. Результаты измерений представлены на рис. 2. Кривые 1 и 2 практически параллельны друг другу и удовлетворительно аппроксимируются прямыми с одинаковым угловым наклоном. Из измерений следует, что пространственная характеристика удельного сопротивления описывается степенным выражением:

$$\rho \sim L^{-0.85 \pm 0.03}. \quad (1)$$

Не выписываемый здесь множитель имеет разные значения для различных расстояний L питающих электродов, а также зависит от масштабов единиц измерения.

Измерение на переменном токе

Следующий цикл измерений состоял в том, что в ствол живой сосны вводились два электрода, расположенные на разной высоте, к которым подавалось переменное напряжение с частотами 100, 120, 1000 и 10 000 Hz. Измерение сопротивления проводились прибором АМ-3003. В ходе измерений изменялось расстояние между электродами. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Примерно одинаковый наклон полученных линий свидетельствует об универсальности фрактальной размерности, которая одинакова для всего ствола сосны и не

зависит от частоты. Усредняя все линии 1–4, получаем прямую 5 на рис. 3. Хотя каждая линия строилась всего по 4 точкам, но усредненная прямая 5 проведена как бы по $4 \cdot 4 - 3 = 13$ точкам, что повышает достоверность получаемой частотной характеристики сопротивления древесины данной сосны:

$$R \sim f^{-0.053 \pm 0.002}. \quad (2)$$

Погрешность численных показателей в формулах (1) и (2) составляет 2%.

Моделирование фрактальной геометрией

Сначала приведем соотношение, устанавливающее связь между размерностью блуждания h и фрактальной размерностью D :

$$h = \frac{1}{D}. \quad (3)$$

Это соотношение в работе [5] установлено исходя из следующих положений. Рассмотрение радиофизической задачи заключается в определении частотной характеристики некоторой функции, выраженной через импеданс. Используя инвариантность уравнений Максвелла относительно геометрического подобия, получаем частотную характеристику импеданса. Применив метод иерархического построения эквивалентных электрических схем, описывающий рассматриваемую среду, устанавливаем связь (3) размерности блуждания в частотной характеристике импеданса с фрактальной размерностью распределения проводящих участков среды.

Многомасштабное и самоподобное распределение проводящих и диэлектрических слоев древесины приводит к тому, что ток в стволе дерева будет распространяться вдоль фрактальной линии. Можно сказать, что ток блуждает в древесине. Если L — траектория блуждания переменного тока, f — его частота, ρ — удельное сопротивление древесины, то, как показано

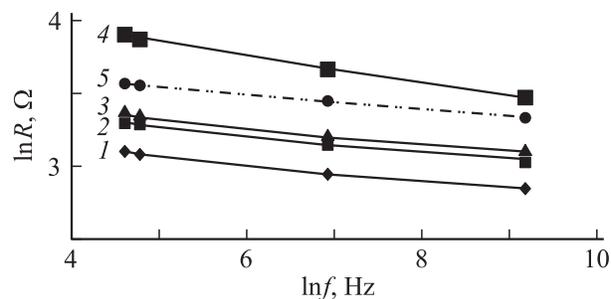


Рис. 3. Частотные зависимости сопротивления R ствола живой сосны радиусом 11.7 см, измеренные на переменном токе: $R \sim f^{-0.053}$. В силу универсальности фрактальной размерности наклон всех линий одинаков. Разнос электродов: 1 — 2.5, 2 — 8, 3 — 15, 4 — 22 см; пунктир 5 — усреднение по четырем кривым.

в [5,6], относительно законов геометрического подобия

$$L' = \eta L, \quad f' = \eta^{-h} f, \quad (4)$$

уравнения Максвелла инвариантны, причем

$$\rho' = \eta^{h-2} \rho. \quad (5)$$

Здесь η — масштабный множитель, h — размерность блуждания. Из (4) и (5) сразу находим пространственную характеристику удельного сопротивления:

$$\rho \sim L^{-h+2}. \quad (6)$$

Сравнив с экспериментальным результатом (1), сначала получим

$$h = 2.85 \pm 0.06, \quad (7)$$

а затем и фрактальную размерность:

$$D = 0.35 \pm 0.01. \quad (8)$$

Для установления частотной характеристики сопротивления R поступим следующим образом. Согласно определению, ρ и R связаны следующим соотношением: $\rho = R \frac{S}{L}$, где S — поперечное сечение. Геометрическое подобие не изменяет S , поэтому с учетом (5) будем иметь

$$L^{-h+2} \sim \frac{R}{L}. \quad (9)$$

Из (4) следует, что

$$L \sim f^{-1/h}.$$

Подставив его в (9), в итоге находим частотную характеристику сопротивления:

$$R \sim f^{-\frac{1}{h}+1}. \quad (10)$$

Сравнив (10) с экспериментальным результатом (2), с учетом погрешности измерения в 2%, получаем для h и D значения, близкие к (7) и (8).

Заключение

В результате измерений установлены степенная пространственная характеристика удельного сопротивления и частотная характеристика сопротивления ствола живой сосны. Теоретическое описание полученных в ходе измерений закономерностей проведено следующим образом. Было принято, что проводящая минерализованная жидкость в стволе дерева распределена самоподобным образом. Это позволило привлечь законы геометрического подобия и теоретически установить степенные пространственные и частотные характеристики измеряемых величин. Таким образом, для данного ствола живой сосны радиусом 11.7 см установлено, что удельное сопротивление образует канторовское множество с фрактальной размерностью $D = 0.35$.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 08-01-98006, 08-02-98007 и интеграционным проектом СО РАН № 56.

Список литературы

- [1] Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Изд-во Ин-та компьютерных исследований, 2002. 656 с.
- [2] Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 262 с.
- [3] Жданов М.С. Электроразведка. М.: Недра, 1986. 316 с.
- [4] Шауб Ю.Б., Шауб С.К. Электротриетрия для экологических и биофизических исследований. М.: Наука, 1992. 192 с.
- [5] Балханов В.К., Башкуев Ю.Б. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. № 6. С. 39–45.
- [6] Балханов В.К., Башкуев Ю.Б., Козлов В.П., Муллаяров В.А. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 1. С. 152–155.