

МЕТОДИКА СВЧ-РАДИОМЕТРИИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ METHODOLOGY OF MICROWAVE RADIOMETRY VEGETATION COVER

Моргачева В.С., студент 4 курса физического факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Воронеж, Россия
Morgacheva V.S., 4th year student at the Faculty of Physics, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. Предложена упрощенная модель регистрации скорости роста растительного покрова на открытой местности, учитывающая особенности ее диэлектрической проницаемости и проводимости.

Ключевые слова: проводимость, тангенс угла потерь, S-параметры, диэлектрическая проницаемость, СВЧ-радиометрия.

Abstract. A simplified model for recording the growth rate of vegetation cover in an open area is proposed, taking into account the features of the dielectric constant and conductivity of the area.

Keywords: conductivity, loss angle tangent, S-parameters, dielectric permittivity; microwave radiometry.

Введение

Сверхвысокочастотная (СВЧ) радиометрия [1] является перспективным методом дистанционного зондирования растительных покровов. Этот метод основан на анализе объектов в микроволновом диапазоне, что дает возможность изучать влажность почвы, биомассу растений и скорость их роста [2].

Широко используемые методы радиометрии для оценки биомассы и влажности растительных покровов, в основном, либо вовсе не включают в расчеты высоту покрова, либо не оценивают скорость его роста, являющуюся важным показателем в сельском хозяйстве [2-5].

В данной работе предложена методика СВЧ-радиометрии для исследования растительного покрова, включающая упрощенную модель определения скорости его роста с учетом затухания сигнала из-за диэлектрических и проводящих свойств местности.

1. Электродинамическая модель растительных покровов

Растительные покровы представляют собой сложные гетерогенные среды, состоящие из множества элементов, таких как листья, ветки, стволы. Эти элементы обладают различными диэлектрическими свойствами, что делает задачу прямого электродинамического моделирования распространения радиоволн в таких средах крайне сложной. В работе предложен подход, основанный на упрощении представления до «смеси» двух материалов – воздуха и растительной среды.

Модель густого растительного покрова в виде сплошной двухкомпонентной среды «элементы растительности – воздух» [1] характеризуется диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon_{\text{эфф}} = \frac{\varepsilon_p(1+pu)+u(1-p)}{\varepsilon_p(1-p)+p+u}, \quad (1)$$

где $10 \leq u \leq 20$ – коэффициент, зависящий от формы элементов растительности; $\varepsilon_p = \varepsilon_v \rho_p$ – диэлектрическая проницаемость растительного покрова; ε_v – диэлектрическая проницаемость воды; ρ_p – объемное влагосодержание элемента растительности.

На диэлектрическую проницаемость растительных компонент влияют такие параметры как плотность заполнения растительностью единицы объема p , относительная объемная влажность ρ_p растительных элементов, количество воды G_B , содержащееся в растительном покрове высотой l_p на площади S [1]:

$$G_B = W_B S = p \rho_p l_p S d_v, \quad (2)$$

$$Q = p l_p d_v, \quad (3)$$

где d_v – удельный вес воды; Q – параметр, характеризующий количество зеленой массы растительности на единицу площади: $Q p \rho_p = W_B$.

Как следует из [1], для травянистых покровов и посевов сельскохозяйственных культур параметры p и ρ_p могут принимать следующие значения: в зависимости от типа, состояния посева и фазы вегетации: $p = 10^{-3} \div 10^{-2}$ для изреженного покрова; $p = 10^{-2} \div 10^{-1}$ для густого покрова; $\rho_p = 0,1 \div 0,2$ для сухой растительности; $\rho_p = 0,5 \div 0,8$ для сырой зеленой растительности. Примерные биометрические показатели ряда сельскохозяйственных культур представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Примерные биометрические показатели ряда сельскохозяйственных культур [1]

Культура	Густота посевов, ед./м ²	Высота растительности, см	Вес зеленой массы с единицы площади, ц/га	Влажность культуры, %	Влагозапас растительного покрова (толщина осажженной воды), мм
Озимая пшеница	400-1000	60-120	20-40 35-130	70-85 50-60	0,25-1,1 0,6-2,2
Озимая рожь	300-700	120-150	20-45	75-85 50-60	0,75-1,3 -
Яровая пшеница	300-500	80-120	50-150	55-65	1,1-2,5
Яровой ячмень	400-900	40-90	-	60-70	0,7-2,4
Кукуруза	5-30	120-320	-	80-85	-
Сахарная свекла	4-80	30-50	125-300	80-90	1,2-2,8

Заметим, что растительный покров является не чисто диэлектрической средой, а имеет некоторую удельную проводимость $\sigma_{\text{раст}}$, которую согласно [3, 5] можно пересчитать для хаотической однородной смеси следующим образом:

$$\sigma_{\text{эф}} = \sigma_{\text{раст}}^{\theta_{\text{раст}}}, \quad (4)$$

где $\theta_{\text{раст}}$ – объемная доля растительного компонента в смеси; $\sigma_{\text{раст}}$ – проводимость растительных компонент.

Проводимость $\sigma_{\text{раст}}$ фитоэлементов растительности составляет $(2-7) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. При этом значение проводимости фитоэлементов хвойного и лиственного леса составляет $(4-5) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$, проводимость фитоэлементов таких культур, как люцерна, клевер на стадии цветения, озимая рожь, пшеница на стадии молочно-восковой спелости, составляет $(5-7) \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ [1].

В таблице 2 приведены значения для температуры 20°C и значений $\sigma_{\text{раст}} = 0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ и $\sigma_{\text{раст}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$. Как видно из таблицы, наличие проводимости существенно влияет на мнимую часть диэлектрической проницаемости ε'' [1].

Таблица 2 – Расчетные значения мнимой части диэлектрической проницаемости фитоэлементов

$\lambda, \text{ см}$	ε''	
	$\sigma_{\text{раст}} = 0 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$	$\sigma_{\text{раст}} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$
2	37,2	37,9
10	13	16,6
20	6,7	13,9
30	4,2	15

Данные формулы справедливо применять, потому что линейный размер растительных неоднородностей, в среднем, в несколько раз меньше длины волны, то есть достаточно мал, чтобы смесь можно было считать однородной.

При прохождении радиоволн через слой растительности возникает экранирование и рассеяние радиоволн при их распространении из-за взаимодействия с растительностью. На данные явления влияют коэффициент отражения от слоя растительности [1, 5]:

$$r = r_0(1 - e^{-\tau}), \quad (5)$$

где $r_0 = \frac{\sigma_p'}{\sigma_p + \sigma_{\text{п}}}$ – альбедо полубесконечной среды; σ_p' – сечение рассеяния в верхнюю полусферу; $\sigma_p, \sigma_{\text{п}}$ – определенные по размерам и ориентациям фитоэлементов сечения рассеяния и ослабления; $\tau = \gamma_3 l_p$ – интегральный коэффициент поглощения; $\gamma_3 = k\sqrt{2\varepsilon'}\sqrt{\sqrt{1 + tg^2\delta} - 1}$ – погонный коэффициент поглощения по мощности; ε' – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости; $tg\delta$ – тангенс угла потерь; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число.

На экранирование и рассеяние влияет степень покрытия почвы растительностью [1]:

$$\xi_{\text{эп}} = 1 - \frac{1}{S} \sum_i S_{0i}, \quad (6)$$

где S_{0i} – площадь участков поверхности, не занятых растительностью («просветов») на обозреваемой площади S . Приближение справедливо, если оно удовлетворяет условию $\frac{S_0}{\lambda l_p} \gg 1$.

Также, при прохождении радиоволн через растительный покров, они испытывают затухание [1-5, 6]:

$$E(d) = E_0 e^{-\alpha d}, \quad (7)$$

где α – коэффициент затухания; d – толщина слоя; E_0 – амплитуда входной волны.

Тангенс угла потерь – еще один важный параметр, отражающий потери электромагнитной энергии, и он напрямую зависит от диэлектрической проницаемости, особенно от содержания воды [6]:

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (8)$$

где ε' – это действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости элементов растительности; ε'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости элементов растительности.

2. Методика проведения измерений скорости роста растения

Для проведения измерений и моделирования будем считать, что антенны расположены на высоте, сравнимой с радиусом первой зоны Френеля, в которой происходит основное взаимодействие радиоволн с растительным покровом. Если растительный покров находится в пределах этой зоны, это приводит к значительному затуханию сигнала, которое будет увеличиваться в соответствии с ростом растительного покрова.

Если в точке А расположен источник (излучающая антенна), а в точке В – приемная антенна (см. Рис. 1.), причем расстояние АВ намного больше длины волны, то первая зона Френеля будет рассчитана следующим образом [7]:

$$R_1 = \sqrt{\frac{r'_0 r''_0 \lambda}{r'_0 + r''_0}}, \quad (9)$$

$$AB = r = r'_0 + r''_0 \gg \lambda. \quad (10)$$

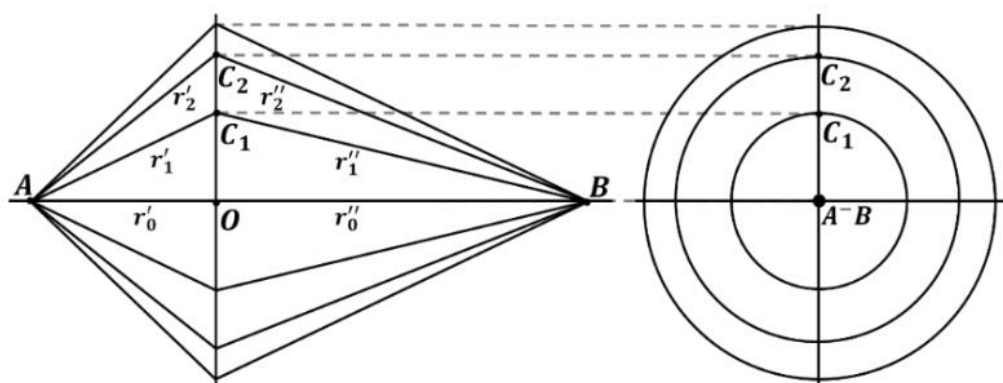


Рисунок 1 – Определение первой зоны Френеля с растительностью

Для описания приемно-передающей системы будем использовать S-параметры. Они связывают падающие и отражённые электромагнитные волны в многопортовых системах. В системе, содержащей две приемно-передающие антенны матричные уравнения примут вид [7]:

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где S_{11} – коэффициент отражения от первого входа; S_{22} – коэффициент отражения от второго входа; S_{21} – коэффициент передачи в прямом направлении; S_{12} – коэффициент передачи в обратном направлении.

Согласно [8], коэффициент передачи в прямом направлении S_{21} можно переписать в виде:

$$|S_{21}| = \left| \frac{E(d)}{E_0} \right|. \quad (12)$$

А согласно [1] коэффициент передачи β для растительного покрова можно записать как:

$$\beta = e^{-2\tau}, \quad (13)$$

где τ – интегральное ослабление излучения в растительном слое.

Например, интегральное ослабление растительного покрова τ в диапазоне длин волн 3-100 см можно определить следующим образом [5]:

$$\tau = 4,34 \nu \frac{W_b}{\lambda} = 4,34 \frac{\nu W_b}{3 \cdot 10^4},$$

где W_b – влагозапас, кг/м²; ν – коэффициент, определяемый из регрессионного анализа экспериментальных данных, изменяющийся в пределах 2,5-5 в зависимости от типа покрова.

Расчетная зависимость интегрального ослабления при $\nu = 3$ $W_b = 4$ кг/м² приведена на рисунке 2.

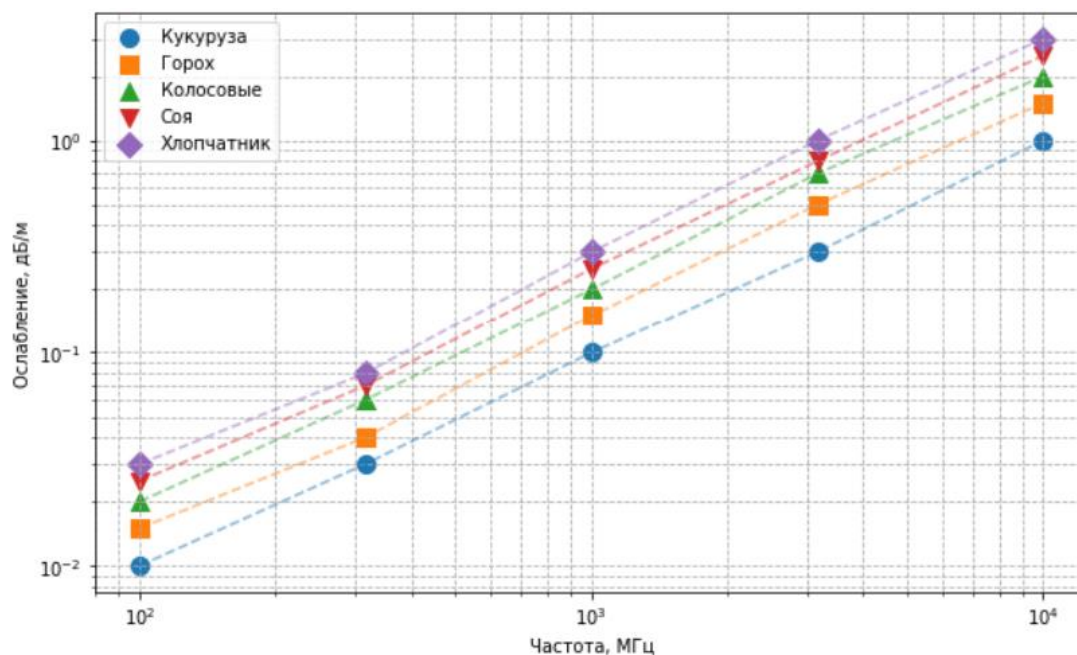


Рисунок 2 – Характерные значения затухания радиоволн в различных типах сельскохозяйственной растительности

В таком случае справедливо следующее:

$$|S_{21}| = e^{-2\tau}. \quad (14)$$

Данная формула помогает связать параметр S_{21} со скоростью роста растения.

Авторами работы [9] была доказана взаимосвязь между S_{21} и объемом растительного покрова. Как следует из графика (см. Рис. 3) с увеличением объема растительного покрова параметр S_{21} убывает по экспоненциальному закону. Данную зависимость можно объяснить тем, что с увеличением объема растительного покрова растет влагосодержание и плотность в растительном покрове, что в свою очередь напрямую влияет на диэлектрическую проницаемость и проводимость покрова.

Тогда, скорость роста растительного покрова можно определить следующим образом. Пусть $v = \frac{dV}{dt}$, где V – объем растительного покрова и $|S_{21}| = e^{-2\tau}$:

$$\frac{dV}{dt} = -2e^{-2\tau} \frac{d\tau}{dt}. \quad (14)$$

Проиллюстрируем это, используя данные об объеме растительного покрова и изменения S_{21} параметра из [9] и отобразим на рис. 4. Данную зависимость также можно объяснить тем, что с увеличением скорости роста растения, увеличивается влагосодержание и плотность растительного покрова.

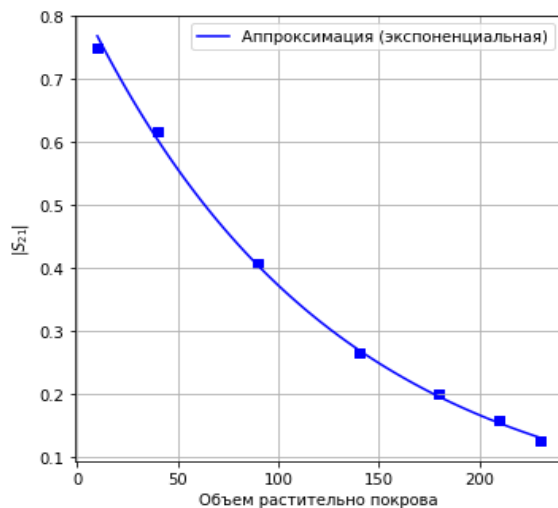


Рисунок 3 – График зависимости S_{21} параметра от объема растительного покрова

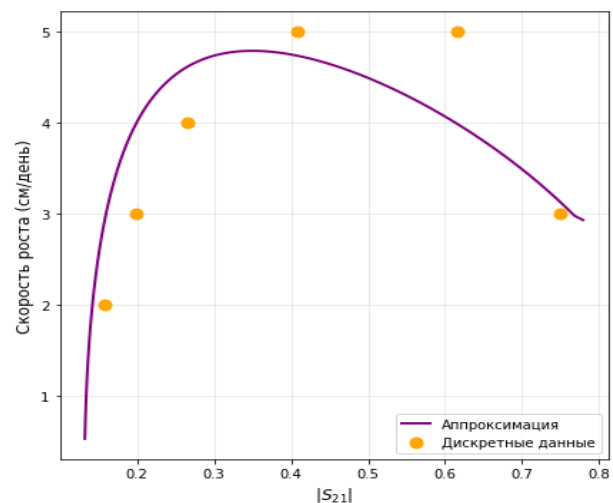


Рисунок 4 – График зависимости скорости роста растительного покрова от S_{21} параметра

Заключение

Предложенная методика СВЧ-радиометрии растительных покровов демонстрирует эффективность использования упрощенной электродинамической модели, учитывающей диэлектрические и проводящие свойства среды. Модель, основанная на представлении растительности в виде гомогенной смеси воздуха и фитоэлементов, позволяет оценивать ключевые параметры, такие как эффективная диэлектрическая проницаемость, проводимость и тангенс угла потерь, которые напрямую зависят от влагосодержания и плотности растительного покрова.

Установлено, что затухание СВЧ-сигнала, описываемое коэффициентом передачи S_{21} экспоненциально связано с объемом растительности. Это открывает возможность косвенного определения скорости роста растений через анализ динамики изменения S_{21} . Практическая

значимость методики подтверждается данными из литературных источников, где продемонстрирована корреляция между уменьшением S_{21} и увеличением биомассы, обусловленным ростом влагосодержания и объемом растительного покрова.

Разработанный подход обладает потенциалом для применения в сельском хозяйстве, позволяя дистанционно контролировать состояние посевов, оценивать фазы вегетации и оптимизировать агротехнические мероприятия. Дальнейшие исследования могут быть направлены на уточнение модели для различных типов культур, а также на интеграцию методики с системами спутникового или беспилотного зондирования для масштабирования на крупные территории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шутко, А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов / А.М. Шутко. – Москва: Наука, 1985. – 215 с.
2. Радиометрия : монография / А.Г. Гудков, И.А. Сидоров, Е.П. Новичихин [и др.]; под ред. А.Г. Гудкова и И.А. Сидорова. – Москва: Научная библиотека, 2024. – 336 с.
3. Чухланцев, А.А. Ослабление электромагнитных волн растительными покровами / А.А. Чухланцев, А.М. Шутко, С.П. Головачев // Радиотехника и электроника. – 2003. – Т. 48, № 11. – С. 1285-1311.
4. Chukhlantsev, A.A. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100-10000 mhz frequency band / A.A. Chukhlantsev, A.M. Shutko, S.P. Golovachev // Журнал радиоэлектроники. – 2003. – № 2.
5. Чухланцев, А.А. Оценки затухания радиоволн диапазона 3-300 см в растительных покровах / А.А. Чухланцев, С.П. Головачев // Лесной вестник (1997-2002). – 2002. – № 1. – С. 112-117.
6. Ishimaru, A. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering / A. Ishimaru. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991. – 656 p.
7. Степкин, В.А. Распространение радиоволн: учебное пособие / В.А. Степкин, К.В. Смысева, Г.К. Усков. – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2024. – 286 с.
8. Pozar, D.M. Microwave Engineering / D. M. Pozarю – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. – 752 p.
9. Ulaby, F.T. Microwave Dielectric Properties of Plant Materials / F.T. Ulaby, R.P. Jedlicka // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1984. – Vol. GE-22, No. 4 – P. 406-415. – DOI: 10.1109/TGRS.1984.350644.

REFERENCES

1. Shutko, A.M. Microwave radiometry of the water surface and soils / A.M. Shutko. – Moscow: Nauka, 1985. – 215 p.
2. Radiometry: monograph / A.G. Gudkov, I.A. Sidorov, E.P. Novichikhin [et al.]; edited by A.G. Gudkov and I.A. Sidorov. – Moscow: Scientific library, 2024. – 336 p.
3. Chukhlantsev, A.A. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation / A.A. Chukhlantsev, A.M. Shutko, S.P. Golovachev // Radio engineering and electronics. – 2003. – Vol. 48, No. 11. – P. 1285-1311.

4. Chukhlantsev, A.A. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100-10000 mhz frequency band / A.A. Chukhlantsev, A.M. Shutko, S.P. Golovachev // Journal of Radio Electronics. – 2003. – No. 2.
5. Chukhlantsev, A.A. Estimation of attenuation of radio waves in the 3-300 cm range in vegetation / A.A. Chukhlantsev, S.P. Golovachev // Lesnoy vestnik (1997-2002). – 2002. – No. 1. – P. 112-117.
6. Ishimaru, A. Electromagnetic Wave Propagation, Radiation, and Scattering / A. Ishimaru. – Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991. – 656 p.
7. Stepkin, V.A. Propagation of radio waves: training manual / V.A. Stepkin, K.V. Smuseva, G.K. Uskov. – Voronezh: VSU Publishing House, 2024. – 286 p.
8. Pozar, D.M. Microwave Engineering / D. M. Pozarю – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2011. – 752 p.
9. Ulaby, F.T. Microwave Dielectric Properties of Plant Materials / F.T. Ulaby, R.P. Jedlicka // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1984. – Vol. GE-22, No. 4 – P. 406-415. – DOI: 10.1109/TGRS.1984.350644.