

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛЕСОВ ПРИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ

А.Г. Гранков, А.А. Мильшин, А.А. Чухланцев

Институт радиотехники и электроники РАН

141190 г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, д.1., тел. 526-91-50

E-mail: agrankov@ms.ire.rssi.ru, amilshin@ms.ire.rssi.ru, chukhlantsev@ms.ire.rssi.ru

При изучении экологических и климатических процессов в лесных системах важная роль принадлежит всепогодным спутниковым СВЧ радиометрическим методам. В работе анализируется современное состояние исследований в области спутникового мониторинга лесов с помощью СВЧ радиометров. Выполнен анализ существующих подходов в моделировании радиотеплового излучения лесов при спутниковых наблюдениях. Рассмотрены преимущества и ограничения анализируемых модельных исследований леса.

Введение

Лес является самым сложным из растительных сообществ объектом. Морфология лесной растительности подвержена сезонным и климатическим изменениям и характеризуется значительными пространственными вариациями. С электродинамической точки зрения лес является случайно-неоднородной средой, состоящей из неоднородностей различного размера, формы, плотности и диэлектрической проницаемости. Характеристики поглощения и рассеяния радиоволн зависят также от агрометеорологических параметров среды (температуры и влажности элементов растительности, воздуха, почвы, наличия и характера осадков), которые, как и морфологическое строение леса изменяются во времени и пространстве. Обзор состояния электродинамического описания растительных сред, включая лес, представлен в работе [1]. Полезная информация о подходах и результатах моделирования радиоизлучения леса содержится в обзоре [2]. Рассмотрим специфические аспекты спутниковых методов.

Это, в первых, необходимость исследования радиационных характеристик леса в широком диапазоне - от миллиметровых до дециметровых волн. Если в области 0.8 – 4.5 см уже существуют многочисленные экспериментальные данные, то на более длинных волнах исследования возможны благодаря моделированию.

Во вторых, при моделировании и тематической обработке необходимо учитывать эффект антенного сглаживания, когда в антенное пятно радиометра попадают участки земной поверхности с существенно различной яркостной температурой (ЯТ). В этом случае ЯТ в пикселе T_p^{BT} определяется как:

$$T_p^{BT} = \sum_{j=1}^N f_j T_j^{BT}, \text{ где } f_j, T_j^{BT} - \text{соответственно, относительные площади и ЯТ } j \text{ типа поверхности (откры-$$

той почвы, почвы с растительностью, водной поверхности и т.п.) в пикселе. В работе [3] при моделировании излучения земной поверхности на волне 21 см авторы ограничились учетом четырех типов поверхности – открытой почвы, леса, травянистой поверхности и открытой воды.

При спутниковых наблюдениях радиометр принимает излучение, формируемое тремя средами - почвой, растительностью и атмосферой. Яркостная температура системы почва - лес - атмосфера (СПЛА) может быть представлена в виде полуэмпирической модели [4,5]:

$$T_{\Sigma}^{BT} = T_S^{BT} + T_C^{BT} + T_{SKY}^{BT}, \quad (1)$$

где T_S^{BT} - излучение почвы, ослабленное лесным пологом и атмосферой:

$$T_S^{BT} = (1 - r_S) T_S \exp(-\tau_C - \tau_A); \quad (2)$$

T_{SKY}^{BT} - прямое восходящее T_A^{BT} излучение атмосферы и отраженное излучение атмосферы T_A^{BT} и космоса T_{COS}^{BT} , ослабленное лесом и атмосферой:

$$T_{SKY}^{BT} = T_A^{BT} + r_S (T_A^{BT} + T_{COS}^{BT} \exp(-\tau_A)) \exp(-2\tau_C - \tau_A); \quad (3)$$

T_C^{BT} - прямое и отраженное излучение леса:

$$T_C^{BT} = T_C (1 - \omega_C) [1 - \exp(-\tau_C)] \cdot [1 + r_S \exp(-\tau_C)] \exp(-\tau_A) \quad (4)$$

с температурой полога T_C и почвы T_S ; интегральным ослаблением пологом τ_C и атмосферой τ_A ; коэффициентом отражения почвы r_S .

Спектральная зависимость ЯТ СПЛА обусловлена наличием частотной зависимости параметров $r_s(f)$, $\omega_c(f)$, $\tau_A(f)$ и $\tau_C(f)$ в соотношениях (3) - (4). Частотные зависимости коэффициента отражения почвы и альbedo растительности имеют монотонный характер и слабо влияют на спектральный характер $T_\Sigma^{BT}(f)$. Для определения r_s имеется обширный материал в монографии [6]. Расчетные соотношения для альbedo приведены в [7]. Спектральная зависимость $\tau_A(f)$ имеет выраженный характер, обусловленный наличием резонансных областей поглощения в линии кислорода (~ 0.5 см) и водяного пара (~ 1.35 см). Поглощение в атмосфере хорошо изучено, и данные можно найти в [6,8].

Из соотношений (2) - (6) следует, что основным параметром, характеризующим поглощение радиоволн лесным пологом, является τ_C , которое определяется поглощением в листьях, хвое, ветвях крон и стволах:

$$\tau_C = \tau_L + \tau_N + \tau_B + \tau_T \quad (5)$$

Выбор модели для интегрального поглощения τ_C является *ключевой задачей* при моделировании и интерпретации спутниковых данных.

Модельные подходы

Первый подход в моделировании радиоизлучения полога

В рамках простой дискретной модели элементы лесного полога моделируются диэлектрическими цилиндрами (хвоя, ветви) и дисками (листва). В этом случае составляющие интегрального поглощения для кроны определяются как [7]:

$$\tau = A_p k_o \sec \theta \varepsilon_v'' t_p Q / \rho_v, \quad (6)$$

где A_p - параметр, зависящий от геометрической формы рассеивающих элементов растительности; k_o - волновое число; θ - угол зондирования от надира; Q - масса растительности на единицу площади; ρ_v - удельная плотность сырой растительности; ε_v'' - мнимая часть комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) растительности; t_p - коэффициент пропускания листа или иголки; индекс p относится к горизонтальной (ГП) или вертикальной (ВП) поляризации.

Для оценки величины интегрального поглощения необходимы знания о КДП, мнимая часть которого определяет спектральный характер поглощения радиоволн. Древесная растительность состоит из смеси воздуха, сухой древесины, связанной и свободной воды. КДП растительности ε_v в соответствии с теорией диэлектрических свойств смеси определяется [5] как:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_d + \varepsilon_{bw} \nu_{bw} + \varepsilon_{fw} \nu_{fw},$$

где ν_{bw}, ν_{fw} - плотности заполнения единицы объема, соответственно, связанной и свободной водой; $\varepsilon_{bw}, \varepsilon_{fw}$ - КДП связанной и свободной воды; $\varepsilon_d = \varepsilon_d' + j\varepsilon_d''$ диэлектрическая проницаемость сухой растительности.

Для иллюстрации спектральной зависимости КДП лесной растительности воспользуемся работой [9], в которой выполнены оценки мнимой части КДП свободной воды (соленость $S = 8$ г/л), хвои и листвы в диапазоне волн 3 мм – 3 м. Результаты расчетов представлены на рис.1. Как следует из графиков, характер спектра мнимой части КДП растительности определяется, главным образом, спектральными особенностями КДП растительной влаги. Подробная информация о моделях и экспериментальных данных КДП растительности приводится в обзоре [1].

Модельные расчеты позволяют получить количественные оценки взаимосвязи радиационных характеристик радиотеплового излучения системы почва-лес с изменениями биомассы (см. рис.2), ее сезонными вариациями, температуры и влагосодержания лесного полога в мм, см и дм диапазонах, исследовать вариации ЯТ СПЛА на суточных и сезонных масштабах [10]. Модели позволяют исследовать поляризационные свойства полога, оценить вклад в общее поглощение элементов полога. К недостаткам подхода следует отнести необходимость знания распределения биомассы и влагосодержания элементов лесного полога, что служит ограничением при глобальном моделировании. Рассмотренный метод не подходит для исследования тропических лесов.

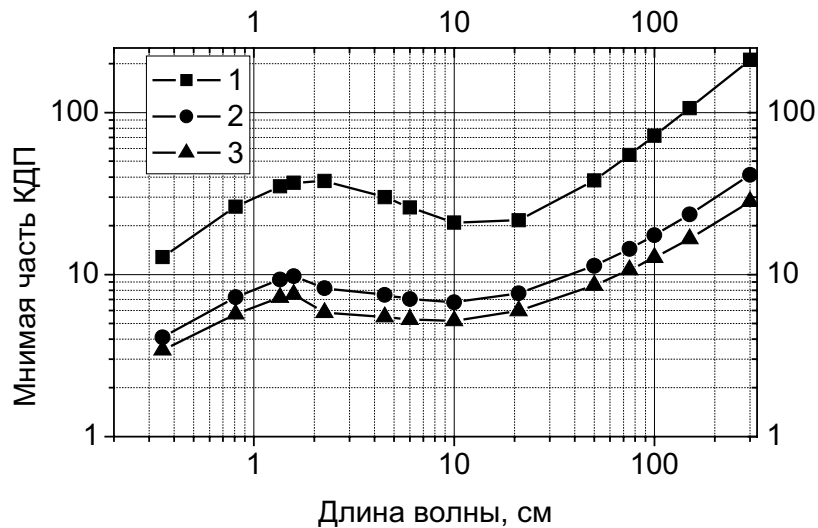


Рис. 1. Спектральная зависимость мнимой части КДП. Кривые: 1 – соленая вода, 2 - листья, 3 – хвоя.

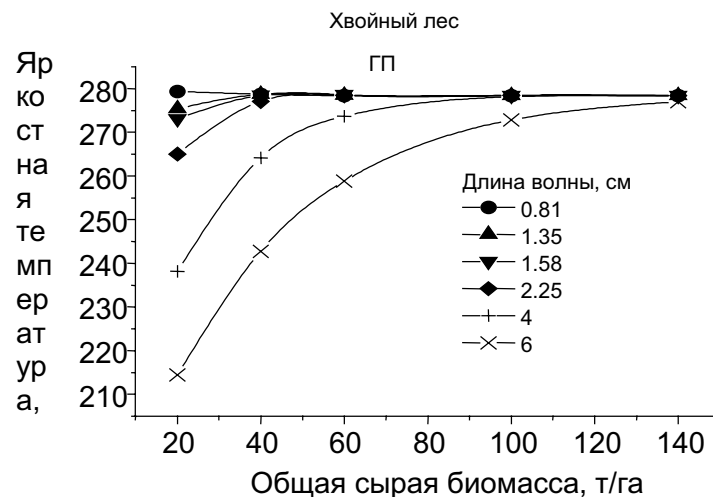


Рис. 2. Спектральная зависимость ЯТ сплошного хвойного полога от биомассы древостоя на ГП.

Второй подход в моделировании радиоизлучения полога

Подход основан на применении сложных моделей излучения лесного полога, учитывающих также поглощение в стволах [2,11-14].

В работах использовалась дискретная модель леса. Стволы моделировались вертикальными цилиндрами, веточки и ветви моделировались хаотично ориентированными цилиндрами, листья моделировались дисками. Крона разделялась на слои: пять в [11], один в [12,14], четыре в [13]. Коэффициент излучения (КИ) системы почва-лес моделировался в диапазоне частот 1.5 - 35 ГГц при угле наблюдения 35° на обеих поляризациях. Модель учитывала механизм поглощения и рассеяния радиоволн элементами растительности. Отметим слабую спектральную зависимость КИ системы почва-лес. Основной вклад в общее излучение вносят листья и почва и минимальный вклад приходится на долю стволов (см. рис.3). В работе [12] исследовалась зависимость ЯТ системы почва-лесной полог от возраста деревьев на трех частотах: 5.33, 1.23 и 0.44 ГГц. Результаты моделирования указывают на выраженные спектральные различия в зависимости ЯТ системы от возраста или биомассы деревьев.

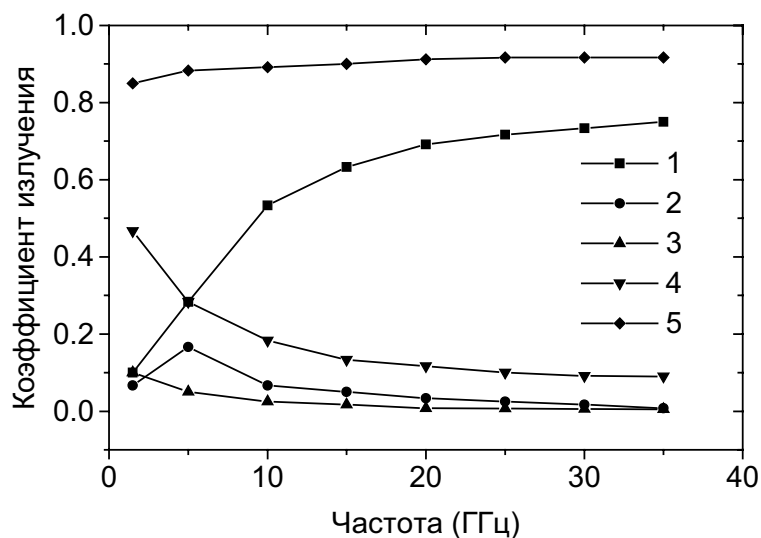


Рис. 3. Спектральная зависимость коэффициента излучения кленового древостоя на ГП: 1 – листья, 2 – ветви, 3 – стволы, 4 – почва, 5 – система почва-лес.

В [13] исследовалась зависимость КИ почвы, стволов, кроны и системы почва-лес на ГП и ВП для лиственного леса в L-диапазоне от угла зондирования. Наибольшая чувствительность поля излучения к углу зондирования отмечается у почвы и стволов и в меньшей степени у кроны и системы почва-лес. Основной вклад в излучение леса вносит крона, причем средние и основные ветки формируют основную долю излучения. Зависимость КИ лиственного леса от сухой биомассы рассматривалась в [14]. Расчеты выполнены на ГП в L-, C-, X-диапазонах для двух углов зондирования 15 и 45 градусов, при наличии и отсутствии листвы.

Рассмотренные выше примеры использования моделей, учитывающих поглощение и рассеяние в стволах, указывают на незначительный вклад стволов в общее радиоизлучение деревьев. Эта группа моделей используется, главным образом, для изучения парциального вклада в общее излучение составляющих полога – листьев, веточек, ветвей и стволов. При моделировании для описания лесной среды требуется несколько десятков параметров, что естественным образом ограничивает сферу применения данного подхода.

Третий подход в моделировании радиоизлучения полога

Подход основан на использовании полуэмпирических моделей τ_c . В ряде случаев вместо выражений (5) и (6) используется полуэмпирическое соотношение [1,6] вида:

$$\tau_c = AfW\varepsilon_v'' = bW, \quad (7)$$

где f - частота; W - влагозапас лесного полога на единицу площади; b - эмпирический коэффициент (удельное ослабление). В практических приложениях удобна другая форма представления интегрального ослабления: $\tau_c = \eta Q$, где η - коэффициент удельного поглощения. Величина коэффициента удельного поглощения по экспериментальным данным составляет $\eta = 0.079 \pm 0.087$ Нп·м²/кг для хвойного и смешанного лесов с $Q = 1.45 - 3$ кг/м² [15]. Значения Q для конкретного типа леса могут быть взяты из баз данных.

Соотношение (7) можно представить в классическом виде: $\tau_c = \gamma L$, где γ - погонное ослабление радиоволн растительностью, L - высота лесного полога. Зная величину γ из экспериментов и высоту лесного полога L можно определить τ_c . В работе [1] приводится эмпирическая модель зависимости погонного ослабления γ (дБ/м) от частоты f (МГц) в виде соотношения $\gamma = Af^C$, где $A = 8 \cdot 10^{-4}$, $C \approx 0.8$ для разных типов лесов (хвойных, лиственных и тропических) диапазоне частот 30 – 9000 МГц. Следует подчеркнуть, что в данных ослабления цитируемых работ учитывается поглощение и рассеяние радиоволн стволами полога. Наиболее подходящими для глобального моделирования радиоизлучения лесов являются результаты работы [1], поскольку они отражают характер спектральной зависимости погонного поглощения для трех основных типов лесов.

Подход отличается от рассмотренных подходов тем, что лесная растительность моделируется сплошной средой. Особенностью архитектуры тропического леса является отсутствие доминирующего типа растительности, на участке в 1 га может совместно произрастать до 100 типов различных видов деревьев. Они обычно располагаются в 3-4 яруса, причем верхний ярус образуют одиночно стоящие деревья высотой до 50-70 м, основной ярус образуют деревья высотой не более 35 м с густым пологом. Своеобразие архитектуры тропического леса не позволяет использовать классические подходы электродинамического моделирования среды в виде набора дисков, эллипсов, тонких и толстых цилиндров. Наиболее адекватным представляется описание полога случайно-неоднородной слоистой средой. Такой подход использовался в работах [16,17] с применением модели непрерывной среды со случайными пространственными флуктуациями диэлектрической проницаемости. Автокорреляционная функция, характеризующая пространственные флуктуации диэлектрической проницаемости растительности лесного полога описывается выражением:

$$\langle \varepsilon_V(r) \cdot \varepsilon_V(r') \rangle = \delta \cdot \varepsilon_{vm}^2 \exp \left[-\frac{|z - z'|}{L_z} - \frac{|x - x'|^2 + |y - y'|^2}{L_r} \right],$$

где δ - вариации диэлектрической проницаемости, ε_{vm} - пространственно осредненная диэлектрическая проницаемость, L_z, L_r - корреляционные интервалы для вертикального и горизонтального направлений.

В цитируемых работах исследовался тропический лес в бассейне Амазонки. СВЧ-измерения радиотеплового излучения леса выполнялись с помощью 10-ти канального радиометра SMMR спутника Nimbus-7. Излучение почвы описывается модифицированным коэффициентом отражения Френеля. Вертикальный температурный профиль полога полагался линейным. При моделировании излучения системы почва-растительность такие параметры как эквивалентная влажность растительности и корреляционные интервалы подбирались на частотах 37, 18, 10.7, 6.6 ГГц с использованием методов наименьших квадратов по экспериментальным и модельным данным. Достоинством рассмотренного подхода является его простота – процедура подбора параметров лесного полога, по сути, является калибровкой, к недостаткам следует отнести искусственность подхода, связанную с наличием спектральной зависимости влажности растительности полога.

Заключение

Рассмотренные подходы отражают особенности моделирования радиотеплового излучения леса при спутниковых измерениях. В настоящее время экспериментальная спутниковая СВЧ радиометрия использует ограниченный спектральный участок от 0.3 до 4.5 см. Применение длинноволнового участка спектра стимулирует переход к глобальному моделированию.

Глобальное моделирование может быть использовано для следующих целей: исследования эффективности применения СВЧ радиометров с низким пространственным разрешением в климатологических задачах, создания и проверки универсальных алгоритмов определения влажности почв и биомассы растительности в рамках миссии SMOS и для совместного использования технологий моделирования (ГИМС) и СВЧ данных в исследованиях глобального углеродного цикла. И в этой связи наиболее эффективным при моделировании характеристик излучения СПЛА представляется подход, использующий полуэмпирические модели ослабления радиоволн в лесном пологе.

Полученные результаты представляют интерес при разработке радиофизических методов для дистанционного зондирования лесной поверхности в сантиметровом и дециметровом диапазонах.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ, грант № 2059.

Литература

1. Чухланцев А.А., Шутко А.М., Головачев С.П. *Ослабление электромагнитных волн растительными покровами // Радиотехника и Электроника. 2003. т.48. № 11. С.1285-1311*
2. Pampaloni P. *Microwave radiometry of forests // Waves in Random Media. 2004. 14. P.275-298*
3. Pellarin T., Calvet J.-C., and Wigneron J.-P. *Surface Soil Moisture Retrieval From L-Band Radiometry: A Global Regression Study // IEEE Trans. on Geos. and Rem. Sens., V.41. NO.9. 2003. P.2037-2051.*
4. Kerr Y.H. and Njoku E.G. *A semi-empirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. GE-28. (3). 1990. P.384-393.*

5. Kerr Y.H., Wigneron J.P. *Vegetation model and observations. A review* // *ESA/NASA International Workshop. VSP, 1994, B.J. Choudhury, J.H. Kerr, E.G. Njoku and P. Pampaloni. P.317-344.*
6. Шутко А.М. *СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. М.: Наука. 1986. 189 с.*
7. Wegmuller U., Matzler C., and Njoku E. *Canopy opacity models* // *ESA/NASA International Workshop. VSP, 1994, B.J.Choudhury, J.H.Kerr, E.G.Njoku and P.Pampaloni. P.375-387.*
8. Шутко А.М., Кутуза Б.Г., Яковлев О.И., Ефимов А.И., Павельев А.Г. *Радиофизические исследования планет. «Радиотехника» (Итоги науки и техники, ВИНТИ). М. 1978.*
9. Мильшин А.А., Гранков А.Г. *Применение спутниковой СВЧ-радиометрии для оценки пожарной опасности лесов* // *Экология, мониторинг и рациональное природопользование. Науч. труды. Вып. 314 (ФЦП «Интеграция»). М.:2001. С.73-83.*
10. Мильшин А.А., Гранков А.Г., Шелобанова Н.К. *Исследование сезонной динамики характеристик излучения системы поверхность-лес-атмосфера в СВЧ-диапазоне* // *Препринт № 3 (624). ИПЭ РАН. М.1998.62 с.*
11. Ferrazzoli P. and Guerriero L. *Modeling microwave emission from vegetation-covered surfaces: a parametric analysis* // *ESA/NASA International Workshop. VSP, 1994, B.J. 11. Choudhury, J.H. Kerr, E.G. Njoku and P. Pampaloni. P.389-402.*
12. Karam M.A. *The potential of microwave radiometers in monitoring forest biomass* // *IGARSS'94. P.1860-1862.*
13. Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., and Ruisi R. *Airborne multi-frequency L- to Ka- band radiometric measurements over forests* // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 39. 2001. P.2507-2513.*
14. Ferrazzoli P. and Guerriero L. *Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation* // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 34. 1996. P.433-443.*
15. Мильшин А.А., Гранков А.Г. *Некоторые результаты экспериментальных исследований радиотеплового излучения леса в L-диапазоне* // *Исслед. Земли из космоса. 2000. № 3. С.50-57.*
16. Calvet J.-C., Wigneron J.-P., Kerr Y.H., and Brito J.L.S. *Use of passive microwaves over the Amazon forest* // *IGARSS'92. Houston. 2. 1992. P.1673-1675.*
17. Noilhan J. and Calvet J.-C. *Mesoscale land-atmosphere models and usefulness of microwave remote-sensing data* // *ESA/NASA International Workshop. VSP, 1994, B.J. Choudhury, J.H. Kerr, E.G. Njoku and P. Pampaloni, pp.17-54.*