

## **Анализ проблем при математическом моделировании радиолокационного отражения от лесных покровов с целью измерения биомассы.**

Калинкевич А.А.\* , Крылова М.С.\* , Кутуза Б.Г.\* , Анютин А.П.\*\*

\* - ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН

\*\* - РОСНОУ.

*Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН, 103907, Москва, ул. Моховая, 11. E-mail: [kalinkevich@newmail.ru](mailto:kalinkevich@newmail.ru), [kalinkevich@newmail.ru](mailto:kalinkevich@newmail.ru)*

*Рассмотрены основные механизмы рассеяния РЛ сигнала от древесины в СВЧ диапазоне. Показано, что используемые модели объектов отражения (почва и стволы деревьев, с различными диэлектрическими свойствами) мало соответствуют реальности и различие результатов расчета рассеивающих свойств лесных покровов значительно.*

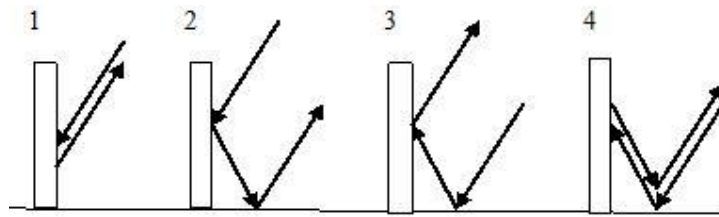
*Main mechanisms of forest backscattering at the microwave frequency band are considered. It is shown that used models of backscattering objects (surface of ground, permittivity of trunks, heterogeneities of trunks) badly correspond to reality. As a result of that difference of calculations of forest backscattering properties can be considerable.*

### **Введение**

Известно, что Р и УКВ диапазон электромагнитного излучения (ЭМИ) обладает высокой проникающей способностью в растительные покровы и в верхние слои почвы и перспективен для изучения характеристик леса с борта самолета с помощью РСА. При радиолокационном исследовании лесов отраженный сигнал формируется не только за счет прямого отражения от элементов дерева, но также за счет переотражения от земной поверхности (двугранный механизм обратного отражения). Последний механизм отражения сигнала считается преобладающим. Для него важен учет диэлектрических свойств верхнего неоднородного слоя почвы. При рассмотрении механизма прямого отражения от элементов дерева большинство предложенных моделей основывается на представлении соснового леса в виде совокупности случайно распределенных рассеивателей (стволы, ветки, иглки деревьев) [1], которые представляются в виде тонких или толстых диэлектрических цилиндров и дисков над земной поверхностью. Как правило, почва рассматривается как плоская поверхность с постоянной диэлектрической проницаемостью; отражение от нее вычисляется, используя известные выражения Френеля. Для случая учета механизма прямого отражения стволы деревьев моделируются однородными диэлектрическими цилиндрами на поверхности (почве). Выполненные экспериментальные исследования показали, что в реальности структура верхнего слоя почвы представляет собой неоднородную среду и значение диэлектрической проницаемости “живой” древесины отличается от диэлектрических свойств ее образцов. Кроме того, влажность ствола дерева (диэлектрические свойства) меняется от центра дерева к его внешней части. Встает вопрос: Какую влажность дерева (значение диэлектрической проницаемости) следует принимать во внимание при расчетах - усредненную по сечению ствола или только по внешней его части?

### **Отражение от стволов деревьев**

Стволы деревьев моделируются однородными диэлектрическими цилиндрами, стоящими на плоской поверхности (почве). Основные механизмы рассеяния от цилиндра представлены на рис. 1.



**Рис. 1. Основные механизмы рассеяния от ствола дерева: 1) рассеяние непосредственно от ствола; 2) рассеяние ствол-земля; 3) рассеяние земля-ствол; 4) рассеяние земля-ствол-земля**

Четыре компоненты рассеяния складываются когерентно:  $S_{total} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4$ ,

$$S_1 = S_{trunk}(\theta; \theta)$$

$$S_2 = S_{trunk}(\theta; \pi - \theta) \cdot R(\theta) \cdot \exp(-j2k_0 h \cos \theta)$$

где:

$$S_3 = S_{trunk}(\pi - \theta; \theta) \cdot R(\theta) \cdot \exp(-j2k_0 h \cos \theta)$$

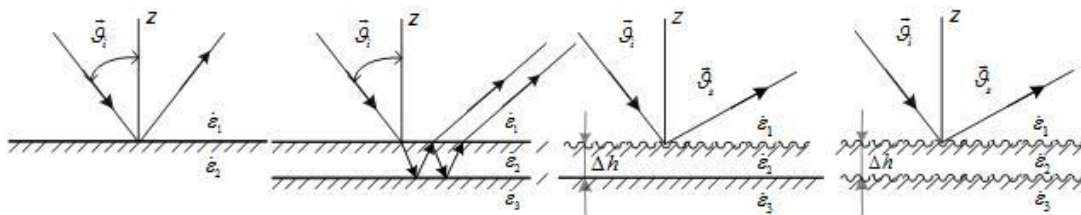
$$S_4 = S_{trunk}(\pi - \theta; \pi - \theta) \cdot R^2(\theta) \cdot \exp(-j4k_0 h \cos \theta)$$

Здесь  $S_{trunk}(\theta_i; \theta_s)$  - величина рассеяния от диэлектрического цилиндра,  $\theta_i$  и  $\theta_s$  - углы, задающие направление падающей и рассеянной волн соответственно,  $R(\theta)$  - френелевский коэффициент рассеяния от плоской поверхности волны, падающей под углом  $\theta$ . Экспоненциальный множитель отвечает за разность хода лучей при когерентном их сложении.  $h=l/2$  - высота рассеивающего центра цилиндра. Полагается, что 2-ой и 3-ий механизмы являются преобладающими. Хорошо известно, что на РЛИ при переходе от поверхности с малым коэффициентом обратного отражения к местности с большим значением коэффициента обратного отражения (например, при переходе от с/х поля к лесу, дороги к лесопосадке и т.д.) наблюдается область (полоса) сильного обратного рассеивания. Появление такой полосы объясняется эффектом уголкового отражения. При отражении от земных покровов рассматриваются несколько моделей (рис.2).

1. Поверхность представляют в виде плоской однородной по пространству и глубине поверхности с некоторым значением комплексной диэлектрической проницаемости. Это основной подход при построении модели отражения от леса.

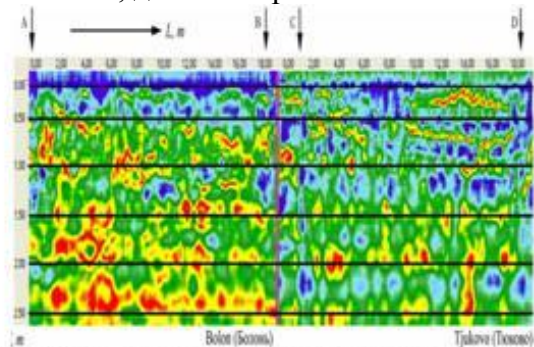
2. Поверхность представляется в виде двух - или трех слоев, имеющих плоские границы и некоторые значения комплексных диэлектрических проницаемостей.

3. Модели слоистых сред с шероховатыми границами



**Рис.2.**

Выполненные нами эксперименты по измерению неоднородностей в верхнем слое почвы в лесу с помощью георадара [2] (рис.3) показывают, что представление верхних слоев почвы, рассмотренное выше, далеко от реальности.



**Рис. 3. Вид неоднородностей верхнего слоя почвы для 2-х лесных районов. Буквами обозначены реперные точки.**

Эффект углового отражения в УКВ диапазоне специфичен на НН и VV поляризациях. Анализ радиолокационных изображений от опор в УКВ диапазоне на ровном поле показал, что коэффициенты Френеля пространственно сильно флюктуируют. Коэффициенты Френеля рассматривались в виде некоторых эффективных коэффициентов, учитывающих средние значения диэлектрических свойств поверхностного слоя почвы, пространственные неоднородности этого слоя почвы, шероховатость и наклон поверхности.

Аналогичная ситуация и при рассмотрении отражения от ствола. При расчетах отражения от диэлектрических цилиндров делается разделение их на тонкие и толстые. При этом понятие тонкого цилиндра относится к случаю, когда длина волны внутри цилиндра является величиной значительно большей его радиуса. В противном случае цилиндры следует считать толстыми. Граница перехода от тонкого к толстому цилиндру определяется условием:  $(2\pi af / c)\sqrt{|\epsilon|} = 1$ , здесь  $a$  - радиус цилиндра,  $f$  - частота радиоволн,  $c = 3 \cdot 10^{10}$  см/с – скорость света. На основании этого равенства определяется граничная частота между расчётами в приближении тонкого и толстого цилиндров. Для вычисления величины рассеяния от тонкого длинного цилиндра длиной  $l$  и радиусом  $a$  может быть использовано приближение Релея-Ганса [3,4]. Как следует из этого приближения при рассмотрении отражения от диэлектрического цилиндра требуется знание комплексной диэлектрической проницаемости ( $\epsilon$ ). Обратное отражение для случая толстого цилиндра можно найти в работе [5], оно также зависит от ( $\epsilon$ ). При построении моделей обратного отражения принимают некоторые значения комплексной диэлектрической проницаемости элементов дерева и поверхности. При этом часто выбранные параметры не обоснованы – основной упор делается на геометрию объекта. Стандартный метод измерения диэлектрической проницаемости биологических объектов [6-8] основывается на взятии образцов и исследовании их в лабораторных условиях. При взятии проб вопросы возможных изменений диэлектрических свойств, связанных с биохимическими процессами, взаимодействием молекул воды, повреждением клеток и т.д., просто не рассматриваются. Однако эти изменения в значительной мере могут влиять на переориентацию молекул воды под воздействием электромагнитного излучения, т.е. на ее диэлектрические свойства.

Улаби [6] выполнены эксперименты по определению зависимости комплексной диэлектрической проницаемости образцов растительности от влажности, температуры,

частоты ЭМИ. Поэтому в ряде работ в период проведения радиолокационных съемок проводились измерения влажности стволов деревьев. Однако выполненные нами исследования показывают, что диэлектрическая проницаемость образцов стволов дерева может значительно отличаться от диэлектрической проницаемости “живого” дерева [9]. Кроме того, влажность ствола дерева меняется от центра дерева к его внешней части. Встает вопрос: Какую влажность дерева (значение диэлектрической проницаемости) принимать во внимание при расчетах - усредненную по сечению ствола или только по внешней его части? На рис.4 представлено изменение диэлектрической проницаемости древесины с глубиной.

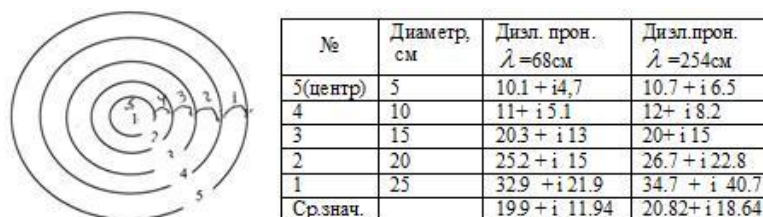


Рис. 4.

Возникает вопрос, будет ли меняться и насколько отражение от диэлектрического цилиндра в случае, если его представить однородным, или состоящим из пяти колец.

Первоначально задача ставилась, как представлено на рис.2.

На цилиндр падает электромагнитная (плоская) волна горизонтальной поляризации, длина волны  $\lambda = 68\text{см}$  (254 см), под углом  $\theta_0 = 60^\circ$  к оси цилиндра. Необходимо было найти амплитуду и фазу отраженной волны и зеркально отраженной, когда

- а) цилиндр представляет однородную среду с различной диэлектрической проницаемостью,
- б) цилиндр состоит из пяти слоев

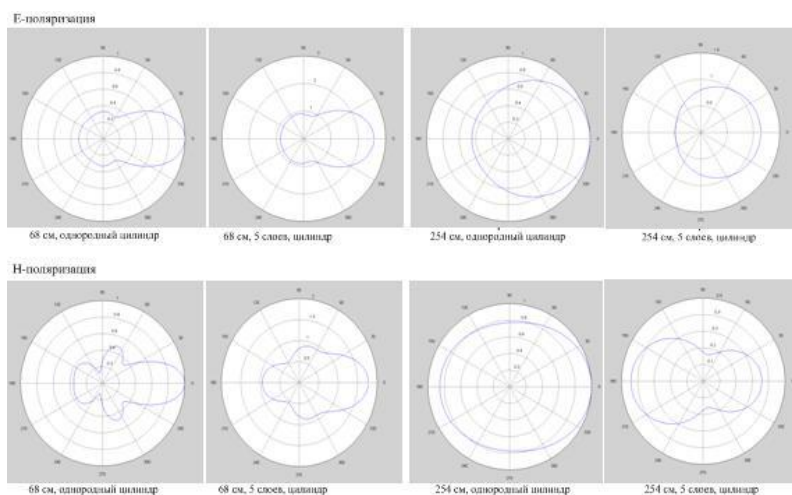


Рис.5. Результаты рассчитанных нормированных диаграмм рассеяния

Решить такую задачу пока не удастся. Поэтому был рассмотрен упрощенный двумерный случай. В качестве модельной задачи выбрана задача дифракции плоской волны на однослойном и пятислойном диэлектрическом цилиндре. Геометрия цилиндров и значения относительной диэлектрической проницаемости приведены в таблице и рис.4. Строгие решения таких задач были получены методом

разделения переменных. Результаты рассчитанных нормированных диаграмм рассеяния приведены на рис.5.

### **Заключение**

В работе представляются результаты измерений влажности дерева по глубине и на основании этих измерений вычислены и построены зависимости диэлектрической проницаемости по глубине. Результаты использовались для моделирования рассеивания ЭМ излучения Р и УКВ диапазонов от однородного цилиндра (диэлектрическая проницаемость усреднялась по всему сечению ствола) и состоящего из пяти слоев. Показано, что расхождение в рассеянии ЭМИ от двух приведенных выше диэлектрических цилиндров велико, повышенная влажность верхнего слоя дерева экранирует влияние внутренних слоев.

Таким образом, принимая во внимание, что: 1) архитектура лесных покровов сложна, 2) диэлектрические и геометрические характеристики верхнего слоя подстилающей поверхности под лесом сильно неоднородны, 3) отсутствуют реальные значения диэлектрических характеристик элементов “живого” дерева, а также учет рассеяния, зависящий от внутреннего строения элементов дерева; трудно рассчитывать на построение хороших моделей обратного отражения от лесных покровов, позволяющих достаточно точно описывать картину рассеяния радиоволн в столь сложной среде. Поэтому при расчетах обратного отражения от леса речь может идти о приближённых, полуэмперических моделях, позволяющих установить основные тенденции связи обратного отражения от параметров лесных покровов. Вопросы точности определения биомассы лесного покрова по характеристикам обратного отражения требует внимательного дальнейшего изучения.

### **Литература**

1. Sami Bellez, Cyril Dahon, Helene Roussel, Analysis of the Main Scattering Mechanisms in Forested Areas: An Integral Representation Approach for Monostatic Radar Configurations, IEEE Trans.Geosci.Remote Sens., vol.47, no.12, pp.4153-4165,dec.2009
2. А.А.Калинкевич, М.С.Крылова, В.М.Масюк, В.Н.Марчук, “Использование георадаров для исследования неоднородностей верхнего слоя почвы хвойного леса“, Радиотехника, №3, 2009, стр.98-103.
3. Stiles J., Sarabandi K. “A Scattering Model for Thin Dielectric Cylinders of Arbitrary Cross Section and Electrical Length”, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 44, No. 2, February 1996, pp. 260-266.
4. Sarabandi K., Senior T., “Low-Frequency Scattering From Cylindrical Structures at Oblique Incidence” // IEEE Transactions on GRS, vol. 28, No. 5, September 1990, pp. 879-885.
5. Armand N.A., Polyakov V.M. Radio Propagation and Remote Sensing of the Environment, CRC PRESS, BocaRaton London New York Washington D.C.2005.
6. El-Rayes M.A., Ulaby F.T. “Microwave Dielectric Spectrum of Vegetation” // IEEE Trans. On Geoscience and remote sensing, vol.GE-25, NO.5, 1987, pp.541-557
7. J.S.Clegg, V E R VcCleant at all Microwave dielectric measurements (0,8-70GHz) on Artemia cysts at variable water content, //Phys. Med.Biol., 1984, Vol.11, 1409-1419.
8. С.А.Родиков, Методы и устройства анализа зрелости яблок, М.ФИЗМАТЛИТ 2009
9. А.А. Калинкевич, М.С. Крылова, В.М.Масюк, А.Ю. Каковкина, Е.А.Хромец. Об опыте измерения диэлектрической проницаемости “живой” древесины. III Всероссийская конференция “Сверхширокополосные сигналы в радиолокации и связи», г. Муром, 26.06-01.07.2010г. (электронный сборник трудов), стр. 169-174.