

объясняются отражением от границы леса, расположенного с другого края поляны, ближе склону горы.

Наиболее интересный эффект выявлен при третьей позиции УО, когда он располагался непосредственно в самом лесу. На рис. 2, в также отчетливо выделяется сигнал от УО, который практически не изменил свою форму и величину, но отражения от слоя леса, стоящего перед УО значительно возросли и превысили уровень сигнала от самого УО. В продольном направлении эта область совпадает с расстоянием от края леса до места установки УО, а в поперечном направлении с учетом диаграммы направленности антенны составляет порядка 40 м.

Здесь необходимо отметить, что данные измерения были проведены в осеннее время, когда деревья находились без листьев. В этом случае отдельные ветви деревьев можно рассматривать как отдельные вибраторы различной длины, где локальные центры рассеяния совпадают с концами вибраторов. Таким образом, они действуют как вторичные излучатели, вызывающие «эффект резонанса» и значительное усиление суммарного отраженного сигнала. В целом данный эффект свидетельствует о наличии в лесу сосредоточенной цели и выявляет возможность определения ее положения в пределах области возбуждения.

Следует заметить, что ЭПР данной цели (УО) достаточно велика. Для реальных целей, например, автомобилей, ЭПР будет заметно ниже. Тем не менее, и в этом случае, т. е. при сосредоточении целей в ле-

су, будет наблюдаться аналогичный эффект. Для оценки возможности обнаружения таких объектов можно использовать соотношение ЭПР объекта к ЭПР окружающей его фоновой поверхности.

Для определения величины относительного контраста необходимо дополнительные измерения ЭПР различных целей на открытом пространстве. Для представленных в работе результатов (рис. 2, в) измеренный уровень контраста между откликами от УО, расположенного в лесу, и уровнем отраженного сигнала от самого леса составил 14 дБ. При изменении угла ориентации УО и состояния леса эти значения могут существенно меняться. Тем не менее, выявленный эффект свидетельствует о наличии цели в лесной среде и выявляет возможность определения ее местоположения.

#### Библиографическая ссылка

1. Скосырев В. И., Осипов М. Л. Особенности и свойства сверхкороткоимпульсной радиолокации // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия «Приборостроение». 1999. № 4. Спецвыпуск «Радиоэлектроника».

#### Reference

1. Skosyrev V. I., Osipov M. L. Vestnik MGTU im. Bauman, serija Priborostroenie. 1999. № 4. Specvypusk "Radiojelektronika".

© Доржиев Б. Ч., Очиров О. Н., Содномов Б. В., 2013

УДК 519.2

### ИЗМЕРЕНИЕ ОБРАТНОГО ОТРАЖЕНИЯ РУПОРНЫМИ АНТЕННАМИ С ДИФРАКТОРНОЙ РАЗВЯЗКОЙ

Ю. Л. Ломухин, Е. Б. Атутов, Б. В. Басанов, В. П. Бутуханов

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. E-mail: lom@pres.bscnet.ru, vbut1951@gmail.com

*Предлагается метод измерения обратного отражения. Получены значения коэффициента обратного рассеяния реальной почвы. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных данных.*

*Ключевые слова: коэффициент обратного рассеяния, границы раздела сред, поляризация, комплексная диэлектрическая проницаемость, предельная глубина погружения волн, обращенная волна, диаграмма направленности антенн.*

### MEASUREMENT OF THE BACKS REFLECTION WITH THE HORN ANTENNA IN DIFFRACTION ISOLATION

Y. L. Lomuhin, E. B. Atutov, B. V. Basanov, V. P. Butukhanov

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: lom@pres.bscnet.ru, vbut1951@gmail.com

*The authors propose a method of measurement of back reflection. The values of the back reflection coefficient in reality soil are obtained. The comparison between the calculated and experimental data is made.*

*Keywords: backs reflection coefficient, the medias interfaces, polarization, complex dielectric constant, the maximum depth of waves, backward wave, antenna directivity diagram.*

Коэффициент обратного рассеяния является основным параметром, содержащим информацию о зондируемом объекте, в частности почвенно-растительных средах.

В настоящее время разработано много моделей в основном в эмпирических или полуэмпирических видах [1–4]. Объясняется это большой сложностью и многофакторностью земных покровов. Однако во многих случаях, например, при небольших значениях глубины проникновения поля в среду, почвенный покров можно считать однородным. В этом случае можно получить строгое выражение для коэффициента обратного рассеяния и обобщить его на случай неровной поверхности.

Если в плоскости падения электромагнитной волны лежит вектор **E** (ТМ-мода), то коэффициент обратного рассеяния имеет вид

$$\sigma_{VV}(\varphi_1) = 20 \lg \left\{ \alpha_{\parallel} \left[ V_{\parallel}^2(\varphi) e^{-2ik_1 h_1 / \cos \varphi} + \left[ 1 - V_{\parallel}^2(\varphi) \right] e^{-2ik_2 h_2 / \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \sin^2 \varphi}} \sqrt{\left(1 + \sin^2 \varphi\right)^2 + \frac{1}{4} \sin^2 2\varphi} \right] \cos \varphi \right\}, \quad (1)$$

$$\alpha_{\parallel} = 1 + \frac{GF(\varphi_1) V_{\parallel}(0)}{V_{\parallel}^2(0) e^{-2ik_1 h_1} + \left[ 1 - V_{\parallel}^2(0) \right] e^{-2ik_2 h_2}},$$

и если вектор **H** лежит в плоскости падения (ТЕ-мода), то

$$\sigma_{HH}(\varphi_1) = 20 \lg \left\{ \alpha_{\perp} \left[ V_{\perp}^2(\varphi) e^{-2ik_1 h_1 / \cos \varphi_1} + \left[ 1 - V_{\perp}^2(\varphi_1) \right] e^{-2ik_2 h_2 / \sqrt{1 - \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^2 \sin^2 \varphi}} \right] \cos^2 \varphi \right\} \quad (2)$$

$$\alpha_{\perp} = 1 + \frac{GF(\varphi_1) V_{\perp}(0)}{V_{\perp}^2(0) e^{-2ik_1 h_1} + \left[ 1 - V_{\perp}^2(0) \right] e^{-2ik_2 h_2}},$$

где  $F(\varphi_1)$  – диаграмма направленности;  $G$  – коэффициент усиления антенны радара;  $V_{\perp}(\varphi), V_{\parallel}(\varphi)$  – коэффициенты Френеля:

$$V_{\perp}(\varphi_1) = \frac{Z_1^{\perp} \cos \varphi_1 - Z_2^{\perp} \cos \varphi_2}{Z_1^{\perp} \cos \varphi_1 + Z_2^{\perp} \cos \varphi_2},$$

$$Z_1^{\perp} = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\mu_1}}, Z_2^{\perp} = \sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\mu_2}};$$

$$V_{\parallel}(\varphi_1) = \frac{Z_1^{\parallel} \cos \varphi_1 - Z_2^{\parallel} \cos \varphi_2}{Z_1^{\parallel} \cos \varphi_1 + Z_2^{\parallel} \cos \varphi_2},$$

$$Z_1^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_1}{\varepsilon_1}}, Z_2^{\parallel} = \sqrt{\frac{\mu_2}{\varepsilon_2}},$$

$$k_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_1}, k_2 = k_0 \sqrt{\varepsilon_2}, k_0 = \frac{\omega}{c},$$

где  $\varphi$  – угол падения на поверхность раздела сред (угол между осью диаграммы направленности и нормалью к поверхности;  $\varphi_2$  – угол преломления. Параметры  $h_1$  и  $h_2$  в формулах (1), (2) – это границы излучающих объемов в средах 1 и 2. Они определяются из уравнений энергетического баланса в первой и второй средах. Приближенно, при  $2 < \varepsilon'_{1,2} < 10$

$h_{1,2} \cong \frac{\lambda}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sqrt{\varepsilon'_{1,2} + \varepsilon''_{1,2}{}^2} - \varepsilon'_{1,2}}}$ . Здесь  $\varepsilon'_{1,2}$  и  $\varepsilon''_{1,2}$ , действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости;  $\lambda$  – длина волны в вакууме. Формулы (1) и (2) приближенно обобщаются на случай неровной границы раздела сред, умножив коэффициенты Френеля на  $\exp(-k \Delta \cos \varphi_2)$ ;  $\Delta$  – СКО неровностей.

Для пояснения физического механизма, лежащего в основе получения формул (1) и (2), приведем рис. 1.

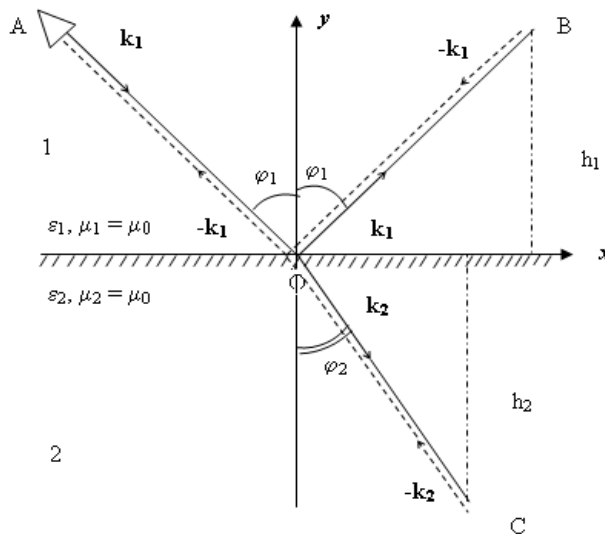


Рис. 1. Схема формирования радиолокационного отражения

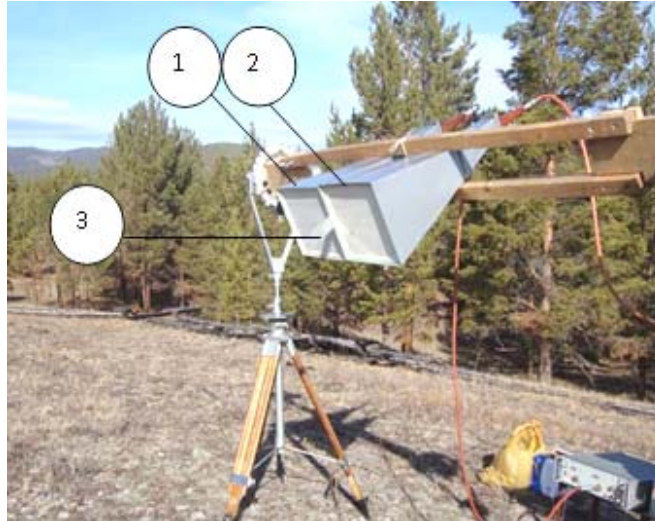


Рис. 2. Установка для измерения обратного отражения почвенного покрова

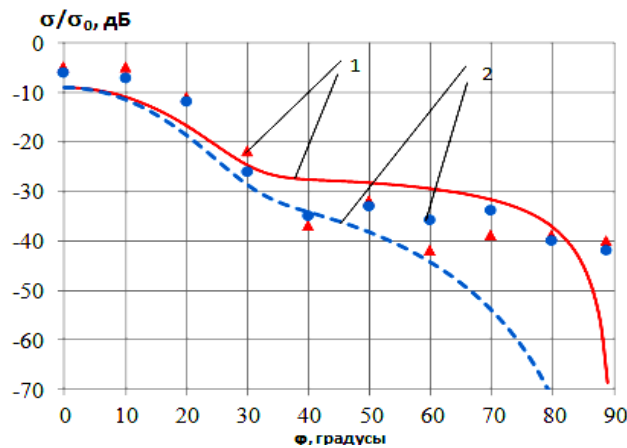


Рис. 3. Зависимость коэффициента обратного рассеяния почвенного покрова от угла падения

В соответствии с рис. 1, волна, излученная радаром А, падает в направлении АО на границу хОу. В точке О одновременно возбуждаются волны, отраженные в направлении ОВ и преломленные в направлении ОС. Своим полем эти волны возбуждают (поляризуют) среды 1 и 2, в результате образуются переизлученные (встречные) волны, распространяющиеся по тем же траекториям, только в обратном направлении. Таким образом, в сторону радара А приходят две обращенные волны, которые и образуют обратное или радиолокационное отражение.

В данной работе проведено измерение коэффициента обратного рассеяния реальной почвы. Общий вид установки приведен на рис. 2.

Измерения проводились с помощью рупорных антенн П6-23 шириной диаграммы направленности  $\Delta\theta = 27^\circ$ , коэффициентом усиления  $G = 13$  дБ. Раскрыты апертуры антенн 1 и 2 лежат в одной плоскости и для дополнительной электромагнитной развязки применен дифракционный элемент в виде прямоугольной проводящей пластины 3, размеры которой выбирались в соответствии с размерами апертуры

и длины волны. Одна из антенн подключалась к генератору, другая к приемному устройству. Измерения проведены при частоте сигнала  $f = 1,5$  ГГц.

При расчетах коэффициента обратного рассеяния по (1) и (2) диэлектрическая проницаемость почвы принималась как  $\epsilon = 16,5 - i0,099$ , что соответствует смеси содержанием 50 % песка влажностью 15 и 50 % глины влажностью 15 %. Поверхность раздела сред считается шероховатой со среднеквадратическим отклонением неровностей  $\Delta = 0,0016$  м.

Теоретические (сплошные и штрихпунктирные линии) и измеренные (треугольные и точечные символы) значения коэффициентов обратного рассеяния показаны на рис. 3. Здесь по оси ординат отложены относительные значения коэффициента обратного рассеяния  $\sigma/\sigma_0$ , дБ, где  $\sigma_0$  соответствует обратному отражению от металлической поверхности при  $\phi = 0$ . По оси абсцисс отложены значения углов падения  $\phi$  в градусах.

Данные 1 относятся к вертикальной поляризации, данные 2 – к горизонтальной поляризации. Из рис. 3 следует, что при  $0^\circ < \phi < 30^\circ$  экспериментальные

и расчетные данные согласуются, при  $\varphi > 30^\circ$  наблюдаются расхождения. Данное расхождение связано с недостаточным динамическим потенциалом аппаратуры.

#### Библиографические ссылки

1. Родионова Н. В. Оценка параметров почвы по радарным данным с использованием эмпирической модели и декомпозиции по механизмам рассеяния // Исследование Земли из космоса. 2009. № 1. С. 3–8.
2. Nashashibi A., Ulaby F. T., Sarabandi K. Measurement and Modeling of the Millimeters-Wave Backscatter Response of Soil Surfaces // IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. 1996. Vol. 34, № 2.
3. Characterization of Radar Backscatter Response of Sand-Covered Surfaces at Millimeters-Wave Frequencies / A. Y. Nashashibi, K. Sarabandi, F. A. Al-Zaid, S. Alhumaidi // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 50, № 6, 345–2354, June 2012.
4. Ulaby F. T., Allen C. T., Fung A. K. Method for Retrieving the True Backscattering Coefficient from

Measurements with a real Antenna // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1983. Vol. GE-21, № 3. P. 308–313.

#### References

1. Rodionova N. V. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2009, no. 1, pp. 3–8.
2. Adib Nashashibi, Fawwar T. Ulaby and Kamal Sarabandi. Measurement and Modeling of the Millimeters-Wave Backscatter Response of Soil Surfaces. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, Vol. 34, № 2, March 1996.
3. Nashashibi A. Y., Sarabandi K., Al-Zaid F. A., Alhumaidi S. Characterization of Radar Backscatter Response of Sand-Covered Surfaces at Millimeters-Wave Frequencies. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 50, № 6, 345–2354, June 2012.
4. Fawwar T. Ulaby, Christopher T. Allen and Adrian K. Fung. Method for Retrieving the True Backscattering Coefficient from Measurements with a real Antenna. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21, № 3, 308–313, July 1983.

© Ломухин Ю. Л., Атутов Е. Б., Басанов Б. В.,  
Бутуханов В. П., 2013

УДК 519.2

### РАДИОЯРКОСТНАЯ ТЕМПЕРАТУРА И КОЭФФИЦИЕНТ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Ю. Л. Ломухин

Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 8. E-mail: lom@pres.bscnet.ru

*Показана связь между коэффициентом обратного рассеяния и радиояркой температурой.*

*Ключевые слова: лемма Лоренца, радиояркая температура, коэффициент обратного рассеяния.*

### THE BRIGHTNESS TEMPERATURE AND THE BACKSCATTERING COEFFICIENT

Yu. L. Lomuhin

Institute of Physical Materials Science of Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
8 Sakhyanova st., Ulan-Ude, 670047, Russia. E-mail: lom@pres.bscnet.ru

*A relationship between the backscattering coefficient and brightness temperature is shown.*

*Keywords: Lorentz lemma, brightness temperature, backscattering coefficient.*

Тепловое излучение содержит информацию о физических, геометрических и других свойствах нагретых тел. Измерение радиотеплового излучения радиометром основано на стремлении к равновесному состоянию тел с разными температурами. При этом между радиометром и измеряемым телом, в частности, земной поверхностью, существует электромагнитное

взаимодействие. Оба тела (радиометр и измеряемый объект), как излучают, так и поглощают электромагнитное излучение в соответствии с законами теплового излучения.

Рассмотрим механизм распространения волн от радиометра до земной поверхности и обратно, рис. 1.