

## ДИАГНОСТИКА ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ РЕФЛЕКТОГРАММ СИГНАЛОВ ГЛОНАСС И GPS

В. Л. Миронов<sup>1,2</sup>, А. В. Сорокин<sup>1,2</sup>, М. И. Михайлов<sup>2</sup>, С. В. Фомин<sup>2</sup>, К. В. Музалевский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>2</sup>Институт физики имени академика Л. В. Киренского, Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук Россия  
Россия, 660036, Красноярск, Академгородок, 50/38. E-mail: sorav@iph.krasn.ru

*Получены интерференционные рефлектограммы почвы в натуральных условиях с использованием регистрации сигналов излучения группировок навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS приемными антеннами с разными поляризационными характеристиками. Разработан и апробирован алгоритм восстановления влажности поверхностного слоя почвы и его геометрических характеристик на основе использованием пространственного отбора и статистической обработки временных зависимостей рефлектограмм. Использована обобщенная температурно-минералогически зависящая диэлектрическая модель для влажных почв. Показано, что использование дипольных антенн в методе интерференционной рефлектометрии более эффективно для восстановления почвенной влажности.*

*Ключевые слова: интерференция, рефлектограмма, поляризация, сигналы навигационных спутников, влажность, поверхностный слой, почва.*

## DETERMINATION OF SOIL MOISTURE USING POLARIZATION REFLECTOGRAM OF GLONASS- AND GPS-SIGNALS

V. L. Mironov<sup>1,2</sup>, A.V. Sorokin<sup>1,2</sup>, M. I. Mihaylov<sup>2</sup>, S. V. Fomin<sup>2</sup>, K.V. Muzalevskiy<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prospect, Krasnoyarsk, 660014, Russia

<sup>2</sup>Institute of Physics named after academician L. V. Kirenskiy, Krasnoyarsk Scientific Center  
of the Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
50/38 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia. E-mail: sorav@iph.krasn.ru

*The authors present the received interference reflectograms of soil in natural conditions with the use of registration of the signals of radiation of the constellations of navigation satellites GLONASS and GPS by receiving aerials with different polarizing characteristics. The algorithm of restoration of humidity (wet) in the surface soil layer and its geometry is designed and evaluated on the basis of the use of spatial selection and the statistical processing of time dependences of the reflectograms. The generalized refractive dielectric model for wet soils was used. It is shown that the use of dipole aerials in the method of interferential reflectometry is more efficient for reconditioning of the soils moisture.*

*Keywords: interference, trace, polarization, the signals of navigation satellites, humidity (wet), surface layer of soil.*

В прошедшее десятилетие активно развиваются методы интерференционной рефлектометрии с использованием сигналов группировок навигационных космических аппаратов (НКА) ГЛОНАСС и GPS [1–4]. Исследования в данном направлении определяют реальную перспективу создания эффективных методов непрерывного локального мониторинга приповерхностных характеристик почвы с растительными покровами различного типа.

В данной работе представлены экспериментальные данные по определению влажности почвы на основе регистрации интерференционного рефлектометрического сигнала от поверхности почвы. В экспериментах были использованы селективные по поляризации антенны. Регистрировались интерференционные рефлектограммы для правой круговой и вертикальной

поляризациями, с вариациями высоты расположения приемного модуля над поверхностью почвы.

**Эксперимент.** В измерениях использовано когерентное радиоизлучение навигационных космических аппаратов (НКА) группировок ГЛОНАСС и GPS. Рабочие частоты сигналов отдельных спутников ГЛОНАСС лежат в диапазоне  $1598,0625 < f < 1604,25$  МГц (соответственно длины волн  $18,76 > \lambda_i > 18,69$  см, аппараты системы GPS излучают волны на частоте  $f = 1575,42$  МГц,  $\lambda = 19,03$  см)

В качестве измерительной аппаратуры использовался мобильный радиоприемный комплекс МРК-32. Для регистрации и хранения полученной информации применялся ноутбук. МРК-32 позволяет в реальном времени, круглосуточно, принимать сигналы обеих навигационных систем. Элементарные отсчеты

Интерференционная рефлектограмма сигнала от пашни

амплитуды принимаемого сигнала регистрируются с частотами в интервале 1–2 Гц.

Измерения проведены в северо-западной пригородной зоне города Красноярска 7.07.2012 г. с использованием антенны, принимающей излучение с вертикально поляризованной компонентой напряженности электрического поля. Пашня вспахана и заборонена. Высота подъема антенны над поверхностью почвы 2,8 м. Географические координаты расположения антенны: 56°03'48,25" с. ш., 92°41'20,34" в. д.

Содержание глинистой и песчаной фракций 28 и 72 % соответственно. Характерный параметр поверхностной шероховатости удовлетворяет условию  $\sigma / \lambda \leq 1$ . Объемная влажность почвы в день измерений снята в 5 точках на расстоянии 12 м от антенны и составляет 0,24, 0,26, 0,18, 0,30 и 0,22. Среднее значение – 0,24.

Зарегистрированы и обработаны сигналы 9 спутников системы ГЛОНАСС и 8 спутников системы GPS. Длительность непрерывных сеансов регистрации составляла 3–5 ч. Характерная интерференционная рефлектограмма, соответствующая измерениям над пашней, представлена на рисунке.

**Результаты и обсуждение.** Обработка экспериментальных данных для правоциркулярной и дипольной антенн проводилась по методике, представленной в работе [4]. Массивы данных очищались от аппаратных сбоев и приводились к стандартизованному виду. Модельный расчет амплитуды принятого сигнала как функции соответствующих углов места  $\varphi$  проводился по формуле

$$E = KF[1 + S + R + 2SR\cos \Phi]^{0,5}, \quad (1)$$

где  $K$  – нормировочный множитель;  $F$  – функция диаграммы направленности приемной антенны,  $S$  – параметр шероховатости почвенного слоя;  $R_r = (r_s + r_p)/2$  и  $R_v$  – френелевские коэффициент отражения правоциркулярной или вертикальной поляризации;  $\Phi = \delta_v + (4\pi h^{np} / \lambda)\sin \varphi$  – набег фазы за счет разности хода прямой и отраженной волн;  $h^{np}$  – высота приемника;  $\lambda$  – длина волны;  $\varphi$  – угол места спутника.

Взаимосвязь между диэлектрической проницаемостью и влажностью почвенного слоя рассчитывалась

по температурно – и минералогически зависимой диэлектрической модели почвы [3]. С помощью нелинейного регрессионного анализа проводилась минимизация целевой функции путем варьирования значений искомых параметров расчетной модели.

В таблице представлены результаты по восстановлению влажности свободного почвенного слоя с использованием вертикально ориентированной дипольной антенны по данным регистрации отдельных спутников. При статистической обработке одного сеанса использованы записи без ограничений по диапазону азимутов, что обеспечивает усреднение влажности по площади зондируемого участка вблизи антенны до 400 м.

Влажность почвенного слоя, определенная с помощью дипольной антенны

№ п/п	Навигационный спутник	Высота приемника $h$ , см	Влажность почвенного слоя $W$ , см /см
1	ГЛОНАСС-1	278,8	0,375
2	ГЛОНАСС-2	288,5	0,211
3	ГЛОНАСС-10	301,0	0,150
4	ГЛОНАСС-11	279,3	0,203
5	ГЛОНАСС-13	292,4	0,140
6	ГЛОНАСС-20	285,4	0,140
7	ГЛОНАСС-21	287,6	0,158
8	ГЛОНАСС-22	271,7	0,081
9	GPS-10	271,7	0,202
10	GPS-11	287,5	0,376
11	GPS-13	282,2	0,249
12	GPS-16	282,8	0,381
13	GPS-19	259,0	0,095
14	GPS-23	266,8	0,162
15	GPS-26	269,8	0,198
16	GPS-28	275,7	0,132
17	GPS-30	282,7	0,363
Среднее		280,2	0,213
Доверительный интервал		±5,3	±0,052
Стандартное отклонение		10,3	0,101
Независимые измерения		285	0,24

Запись рефлектограммы в диапазоне углов, содержащем угол Брюстера, дает возможность проводить устойчивую минимизацию целевой функции и запись рефлекторграммы в диапазоне углов, содержащем угол Брюстера, дает возможность восстановить диэлектрическую проницаемость отражающего слоя и, соответственно, усредненную по площади влажность с большей точностью. На рис. 1 приведены интерференционная рефлектограмма и расчетная кривая для модели почвы с содержанием глины 25 % и объемной влажностью  $W = 0,213 \pm 0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$ . Полученные результаты сопоставимы со значениями влажности  $W = 0,244 \text{ см}^3/\text{см}^3$ , определенной независимо термостатно-весовым методом.

Разработана модель формирования интерференционной рефлектограммы почвенными покровами безлесных территорий с применением правоциркулярной и дипольной антенн.

С помощью этой модели проведено восстановление влажности верхнего слоя почвенного покрова. Показано, что значения влажностей, восстановленных из единичных интерференционных рефлектометрических измерений, испытывают значительные вариации, и сделан вывод о необходимости использования массивов данных с большим количеством элементарных отсчетов для оптимизации статистической обработки.

Сопоставление значений восстановленной влажности и измеренной независимым методом показало эффективность восстановления влажности почвы с использованием антенны, принимающей сигнал с вертикальной поляризацией.

### Библиографические ссылки

1. Soil Moisture Retrieval Using GNSS-R Techniques: Experimental Results Over a Bare Soil Field / R.-A. Nereida et al. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. Vol. 47, № 11. P. 3616–3624.
2. Kristine M. Larson et al. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content // IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2010. Vol. 3, № 4. Part 2. P. 91–99.
3. Mironov V. L., Kosolapova L. G., and Fomin S. V., Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2009. Vol. 47, № 7. P. 2059–2070.
4. Восстановление диэлектрической проницаемости почв и лесных покровов при использовании сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS / В. Л. Миронов, С. В. Фомин, А. В. Сорокин и др. // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 9/2. С. 99–101.

### References

1. Nereida Rodriguez-Alvarez et al., IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, V. 47, N. 11, November 2009, pp. 3616–3624.
2. Kristine M. Larson et al. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, Vol. 3, No. 4, part 2, pp. 91–99.
3. Mironov V. L., Kosolapova L. G., and Fomin S. V., IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., Jul. 2009, Vol. 47, N. 7, pp. 2059–2070.
4. Mironov V. L., Fomin S. V., Sorokin A. V., Muzalevskiy K. V, Mihaylov M. I., Izvestiya VUZov. Fizika, 2012. Vol. 55, No. 9/2, pp. 99–101.

© Миронов В. Л., Сорокин А. В., Михайлов М. И., Фомин С. В., Музалевский К. В., 2013

УДК 538.956+537.876.42

## КОЭФФИЦИЕНТЫ ОТРАЖЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ СЛОИСТОЙ СРЕДЫ И ВОЗМОЖНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ОДНОГО ИЛИ ДВУХ СЛОЕВ\*

А. В. Репин, А. С. Яценко

Омский государственный педагогический университет  
Россия, 644099, Омск, наб. Тухачевского, 14. E-mail: x\_rays1@mail.ru

*Приведены результаты определения комплексной диэлектрической проницаемости слоистой среды. Описана методика измерения диэлектрических параметров сразу двух образцов с различными диэлектрическими проницаемостями. Проведена проверка возможности определения диэлектрической проницаемости с одновременным использованием коэффициентов отражения и прохождения. Показано, что данный метод применим для измерения в диапазоне частот от 100 МГц до 4 ГГц. Реализован способ автоматического расчета диэлектрических параметров в программной среде MS Excel. Корректное восстановление диэлектрической проницаемостей возможно, если начальные значения отличаются от истинных не более чем на 10 %. Полученные результаты могут быть использованы при проведении диэлектрических измерений.*

*Ключевые слова:* диэлектрическая проницаемость, коэффициент отражения, коэффициент прохождения, слоистая среда.

\*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 12-05-00502-а).