

Возможности бистатической радиолокации пространственных вариаций влажности и рельефа поверхности почвенного покрова на основе сигналов ГЛОНАСС и GPS

К. В. Музалевский, М. И. Михайлов, В. Л. Миронов

*Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru*

В данной работе предложена методика дистанционного измерения пространственных вариаций рельефа и влажности поверхности почвенного покрова на основе регистрации интерференции сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS вблизи поверхности почвенного покрова. Предложенная методика основана на зависимости мгновенных значений амплитуды и фазы интерференционной диаграммы сигналов ГНСС от влажности и высоты поверхности почвенного покрова вдоль траектории центра эффективной площадки зондирования по мере возвышения спутника ГНСС над горизонтом. В ходе теоретического моделирования показана возможность восстановления пространственных профилей высоты и влажности поверхности почвенного покрова из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС, регистрируемых на частоте L1 (~1,6 ГГц). Значения среднеквадратического отклонения между восстановленными и заданными величинами высоты и влажности поверхности почвенного покрова оказались не более 0,3 см и 0,006 см³/см³ соответственно. Предложенная методика была протестирована в ходе эксперимента по восстановлению рельефа местности из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС в полевых условиях на сельскохозяйственном поле в районе Красноярска. Среднеквадратическая погрешность и коэффициент корреляции между восстановленными значениями высоты рельефа поверхности почвенного покрова и данных контактных измерений оказались равны 0,04 и 0,87 м соответственно.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, GPS, рефлектометрия, влажность почвы, рельеф

Одобрена к печати: 01.08.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-75-82

Введение

В настоящее время ведутся исследования в области применения сигналов, излучаемых спутниками глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS, для бистатической радиолокации поверхности Земли. В этих работах исследуется возможность измерения влажности почвы, высоты уровня воды в водохранилищах, высоты посевов сельскохозяйственных культур и др. (Arroyo, 2016; Zavorotny et al., 2014). Согласно зарубежным научным публикациям, представленным в обзоре (Zavorotny et al., 2014), одним из самых распространённых способов рефлектометрических измерений геофизических параметров подстилающей поверхности является метод регистрации интерференционной диаграммы сигналов ГНСС неподвижным приёмником, антенна которого расположена на высоте нескольких метров над зондируемой поверхностью. В результате возникает явление интерференции мощности, регистрируемой приёмником сигналов ГНСС за счёт сложения на раскрыве антенны прямых и отражённых от подстилающей поверхности волн, излучённых спутниками ГНСС. При этом видность интерференционной диаграммы зависит от амплитуды отражённой волны, которая, в свою очередь, зависит от геофизических свойств подстилающей поверхности. Практическая реализация данного способа зондирования не вызывает сомнения, и в настоящее время на базе сети приёмников сигналов ГНСС, расположенных на западном побережье США (<http://xenon.colorado.edu/portal/>), реализован информационный продукт

по измерению влажности поверхности почвы, высоты снежного покрова и оценки биомассы растительности. В литературе указывается на возможность измерения высоты подстилающей поверхности, но не предложено методик восстановления рельефа поверхности почвы с применением сигналов ГНСС (Arroyo, 2012, 2016). Кроме того, в опубликованных до настоящего времени работах по теме не исследуется возможность измерения пространственных вариаций влажности поверхности почвенного покрова на основе регистрации интерференционной картины сигналов ГНСС вблизи поверхности почвы. Вместе с тем можно заметить, что по мере возвышения спутника ГНСС над горизонтом площадка зондирования, которая совпадает с первой зоной Френеля, перемещается по поверхности почвенного покрова, приближаясь к месту установки приёмной антенны с расстояния нескольких десятков метров, в результате приёмником регистрируется угловая зависимость мощности сигнала в виде интерференционной диаграммы. В этих условиях мгновенная амплитуда и частота интерференционной диаграммы определяются амплитудой и фазой отражённой волны и, соответственно, зависят от влажности и высоты рельефа поверхности почвы в месте расположения первой зоны Френеля. В результате возникает возможность определения эффективной высоты антенны и влажности почвенного покрова из измеренной угловой зависимости интерференционного сигнала спутников ГНСС. При этом в отличие от стандартных методов анализа в данной работе предлагается использовать не всю сразу угловую зависимость интерференционной диаграммы для анализа усреднённых значений параметров подстилающей поверхности, а скользящее по интерференционной диаграмме окно, в пределах которого оказывается возможным восстанавливать мгновенные (пространственно-распределённые) значения влажности и высоты поверхности почвы.

Метод измерения рельефа и пространственной вариации влажности поверхности почвы

Мощность на выходе антенны с вертикальной поляризацией, принимающей сигналы ГНСС над поверхностью Земли, можно представить в следующем виде:

$$U(\theta) = F(\theta) \left[1 + |\Gamma_V(\theta, \varepsilon)|^2 + 2|\Gamma_V(\theta, \varepsilon)| \cos[2k_0 H(\theta) \cdot \cos \theta + \varphi_V(\theta)] + A\sigma S(\theta) \right], \quad (1)$$

$$|\Gamma_V(\theta, \varepsilon)| = |R_V(\theta, \varepsilon)| \exp\left\{-2[k_0 h_r \cos \theta]^2\right\}, \quad (2)$$

где $F(\theta)$ — диаграмма направленности приёмной антенны; R_V — коэффициент отражения Френеля от поверхности влажного почвенного покрова для вертикально поляризованной волны; $k_0 = 2\pi f/c$ — волновое число свободного пространства; f — частота электромагнитной волны; c — скорость света; h_r — среднеквадратичное отклонение высот неровностей поверхности почвы (шероховатость); $H(\theta)$ — кажущаяся высота приёмной антенны над поверхностью почвы; θ — угол падения электромагнитной волны, излучённой спутником ГНСС (зенитный угол спутника); φ_V — фаза коэффициента отражения Френеля; A — максимальная амплитуда осцилляций сигнала ГНСС; σ — среднеквадратическое отклонение шумовой компоненты сигнала ГНСС; $S(\theta)$ — случайная величина, распределённая по нормальному закону, со средним значением и среднеквадратическим отклонением, равными 0 и 1 соответственно; $\varepsilon = \varepsilon(W, C)$ — комплексная диэлектрическая проницаемость (КДП) почвы; W — объёмная влажность почвы; C — содержание глины в почве. КДП почвы рассчитывалась на основе модели (Mironov et al., 2009). Формула (1) соответствует частному случаю, когда азимутальный угол спутника в процессе его возвышения не изменяется. В соответствии с принципом Кирхгофа поле волны, отражённой от поверхности почвенного покрова, формируется на приёмной антенне токами, возбуждаемыми падающей волной на поверхности в области, ограниченной первой зоной Френеля (Beckman, Spizzichino, 1963), которая и является эффективной площадкой зондирования (э. п. з.). Геометрия задачи показана на рис. 1. В формуле (1) величина $H(\theta)$ соответствует высоте антенны относительно центра $[x(\theta), z(\theta)]$

эффективной площадки зондирования. Расстояние от приёмной антенны до центра эффективной площадки зондирования вдоль поверхности Земли может быть рассчитано (см. рис. 1) по формуле:

$$x(\theta) = H(\theta) \operatorname{tg} \theta. \quad (3)$$

В модели (1)–(2) крупномасштабный рельеф местности считался пологим, т. е. наклоны поверхности принимались не более чем $kz(\theta) \cdot \cos \theta < 1$, а локальный коэффициент отражения рассчитывался в приближении горизонтально ориентированной эффективной площадки зондирования. В этих приближениях удаётся разделить вклады вариаций влажности почвы и высот крупномасштабного рельефа местности в регистрируемой интерференционной диаграмме. Действительно, в соответствии с моделью (1)–(2) изменение амплитуды интерференционной диаграммы зависит от вариации влажности почвы, а частота (период) интерференционной диаграммы — от вариации высоты эффективной площадки зондирования относительно фазового центра приёмной антенны (при этом фаза коэффициента отражения $\varphi_r(\theta)$ в формуле (1) является намного медленнее меняющейся функцией по отношению к слагаемому $2k_0 H(\theta) \cdot \cos(\theta)$).

Примем модельное представление диаграммы направленности дипольной антенны вертикальной поляризации в следующем виде:

$$F(\theta) = U_0 \sin^2 \theta, \quad (4)$$

здесь U_0 — мощность на выходе приёмной антенны при размещении антенны в однородном воздушном безграничном пространстве. Далее зададим пространственные вариации рельефа и влажности поверхности почвенного покрова через эффективную высоту антенны в виде функции от зенитного угла спутника ГНСС:

$$H(\theta) = 4 + 0,2 \cdot \cos \theta + 0,05 \cos(8\pi \cdot \cos \theta), \quad W(\theta) = 0,05 + 0,2 \cos \theta. \quad (5)$$

Из формул (5) следует, что высота антенны над почвенным покровом в точке её размещения равна $H_a = H(0) = 4,25$ м, а влажность $W(0) = 0,25 \text{ см}^3/\text{см}^3$. На рис. 2 приведена угловая зависимость интерференционного сигнала, рассчитанная по формулам (1)–(5), при этом задавались следующие численные значения параметров: $C = 0,3$; $\sigma = 0,1$; $P_0 = 100$ отн. ед; $A = 36,6$; $h_r = 0,02$ м. Частота электромагнитной волны, излучаемой спутником GPS, принималась равной $f = 1,57542$ ГГц. КДП почвы рассчитывалась на основе диэлектрической модели (Migonov et al., 2009).

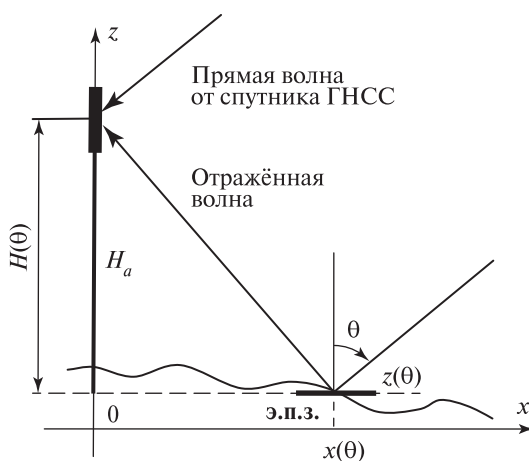


Рис. 1. Многолучевое распространение волны от спутников ГНСС при расположении приёмной антенны (ориентированной на горизонт) на высоте H_a над почвой; θ — зенитный угол спутника; $H(\theta)$ — кажущаяся высота антенны над эффективной площадкой зондирования

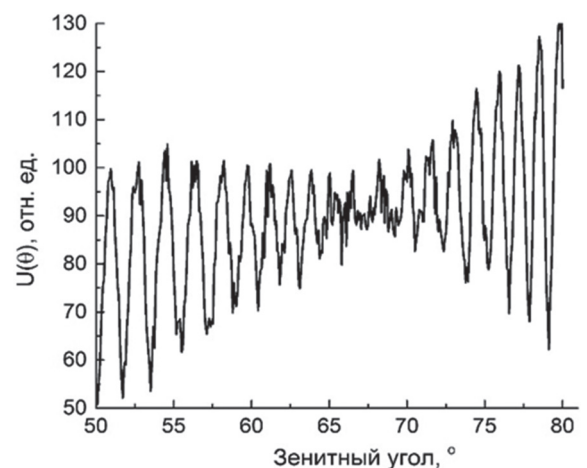


Рис. 2. Интерференционная диаграмма, записанная приёмником с использованием антенны вертикальной поляризации в условиях меняющегося рельефа и влажности почвы

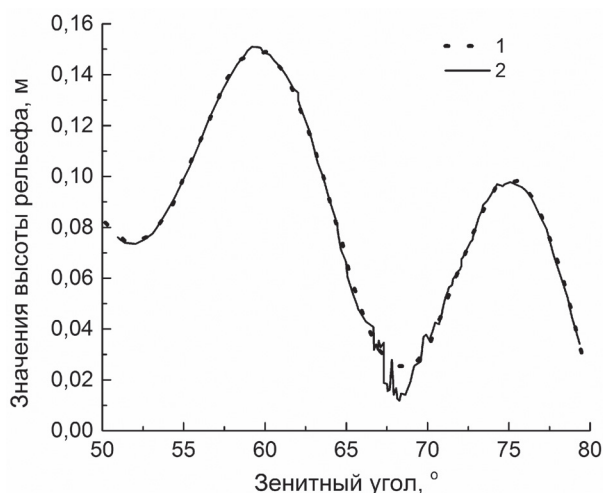


Рис. 3. Значения высоты рельефа $H_r(\theta) - H_a$: 1 — модельный рельеф, 2 — восстановленный рельеф, при уровне шумовой компоненты сигнала $\sigma = 0,1$

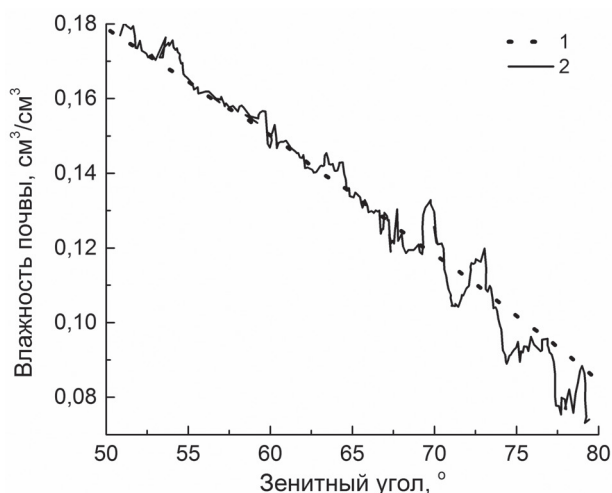


Рис. 4. Значения влажности почвы: 1 — модельная влажность, 2 — восстановленная влажность, при уровне шумовой компоненты сигнала $\sigma = 0,1$

Интерференционная диаграмма, рассчитанная на основе выражений (1)–(5) при заданном среднеквадратическом отклонении шумовой компоненты ГНСС сигнала σ , служила модельным представлением измеренного сигнала $P^m(\theta)$. Обратная задача при восстановлении рельефа и влажности поверхности почвы решалась путём минимизации нормы невязки между модельным представлением измеренного сигнала $P^m(\theta)$ и сигналом $P^{th}(\theta)$, рассчитанным по формулам (1)–(4) при $\sigma = 0$. При этом минимизация происходила в скользящем окне, ширина которого была выбрана равной среднему полупериоду интерференционной диаграммы (см. рис. 2). Внутри скользящего окна при минимизации нормы невязки подбирались влажность почвы $W_r(\theta_{av})$, высота антенны $H_r(\theta_{av})$ и амплитуда P_0 , где θ_{av} принималось равным среднему значению зенитного угла в текущем скользящем окне. Параметр шероховатости почвы в процессе минимизации задавался равным $h_r = 0,02$ м. Отметим, что найденные таким образом мгновенные значения влажности $W_r(\theta_{av})$ и высоты антенны $H_r(\theta_{av})$ соответствуют средним значениям этих величин в пределах перекрывающихся эффективных площадок зондирования — первых зон Френеля, размеры которых изменяются от примерно десяти метров до десятков сантиметров по мере возвышения спутника ГНСС над горизонтом; детальные оценки могут быть найдены в работе (Миронов и др., 2014). На рис. 3 и 4 изображены восстановленные значения высоты рельефа и влажности почвенного покрова.

Величина шумовой компоненты интерференционной диаграммы $\sigma = 0,1$ выбрана с учётом уровня шума сигналов ГНСС, наблюдавшегося с помощью приёмника МРК-32Р в эксперименте. Из данных, приведённых на рис. 3, были оценены среднеквадратические отклонения восстановленных от заданных значений высоты поверхности и влажности почвы, которые оказались равными 0,003 м и 0,006 см³/см³ соответственно. Однако полученные погрешности восстановления высоты и влажности почвенного покрова отражают только влияние уровня шума сигнала ГНСС и адекватность используемого алгоритма минимизации. Более надёжная оценка погрешности восстановления рельефа и влажности почвенного покрова с помощью сигналов ГНСС может быть получена при экспериментальной проверке рассмотренного метода. В силу трудности наблюдения в имеющихся полевых условиях пространственных вариаций влажности почвы предложенная методика была протестирована в случае измерения рельефа местности.

Измерение рельефа почвенного покрова с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS

Для проведения полевых экспериментов по дистанционному зондированию рельефа почвенного покрова на основе измерений интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS был использован серийный приёмник МРК-32Р производства НПО «Радиосвязь», Красноярск. Антенна размещалась на переносной металлической треноге на высоте $H_a = 3,08$ м. Запись интерференционных диаграмм сигналов ГНСС проводилась в пригородной зоне Красноярска (пос. Милино) над посевами ржи перед уборкой. Высота и влажность растений составляла $1,0 \pm 0,1$ м и $0,59$ кг/м³ соответственно. Средневесовое содержание глины в почве ($C = 0,35$ г/г) было определено из результатов гранулометрического анализа почвенных образцов, взятых с различных участков почвенного покрова. Влажность почвы, измеренная контактным термостатно-весовым методом в слое толщиной 5 см в день записи интерференционных диаграмм, составила $0,27$ см³/см³. На *рис. 5* представлены записи нескольких интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS, сделанные в ходе эксперимента. Измерение рельефа местности контактным методом проводилась с помощью буссоли и геодезической рейки в секторе азимутальных углов диаграммы направленности антенны $\varphi_0 - \pi/2 < \varphi < \varphi_0 + \pi/2$, где φ_0 — азимутальный угол спутника. При измерениях контактным методом азимутальный угол изменялся с шагом 18° на расстояниях 0; 5; 10; 15 и 17,5 м от точки расположения антенны приёмника. Значения высоты поверхности почвы над уровнем почвы в точке расположения антенны, полученные в результате интерполяции по данным дискретных измерений, представлены на *рис. 6*, где разным цветом отображены участки местности, на которых высота изменялась в пределах ~ 5 см.

Для восстановления рельефа местности из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС (см. *рис. 5*) использовалась методика, изложенная выше. Восстановленные значения высот рельефа почвенного покрова относительно значения высоты в точке расположения антенны представлены на *рис. 7*. Символами на рисунке отмечены значения высот, измеренные контактным методом. Эти значения даны для среднего азимутального угла в пределах соответствующей траектории центра эффективной площадки зондирования. Корреляция между значениями высот рельефа, восстановленными с помощью сигналов ГНСС и измеренными стандартным геодезическим методом, показана на *рис. 8*.

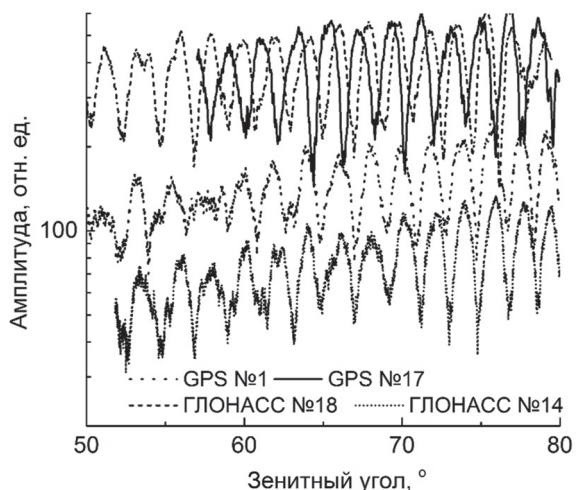


Рис. 5. Интерференционные диаграммы сигналов ГНСС для спутников: GPS № 17 (12:54–13:52), ГЛОНАСС № 18 (12:18–13:40), GPS № 1 (12:12–13:48), ГЛОНАСС № 14 (12:10–13:11)

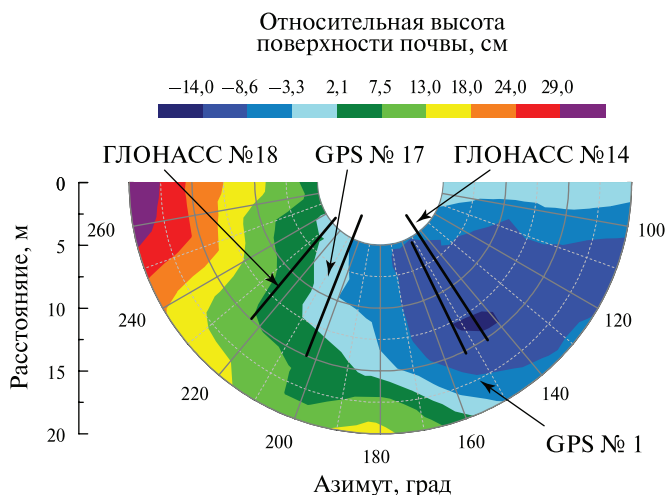


Рис. 6. Высота поверхности почвы, измеренная относительно высоты в точке расположения приёмной антенны. Сплошными линиями показаны траектории центров эффективных площадок зондирования, соответствующие процессу возвышения спутников ГНСС над горизонтом

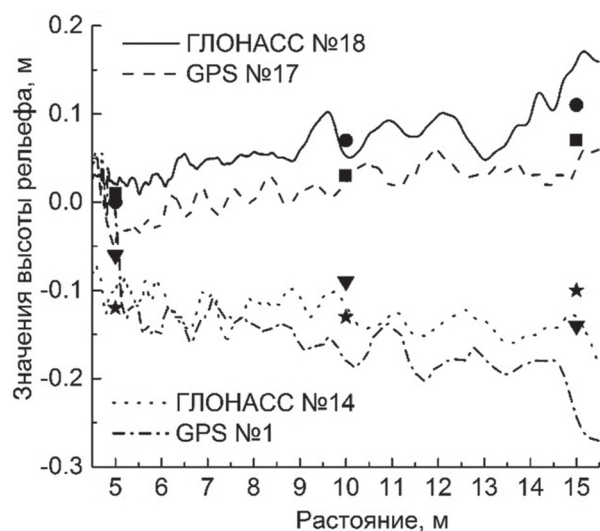


Рис. 7. Восстановленные и измеренные с помощью буссоли и геодезической рейки высоты поверхности почвы. Кругами, квадратиками, треугольниками и звёздочками обозначены измеренные на месте значения высот вдоль траектории спутников ГЛОНАСС № 18, GPS № 17, ГЛОНАСС № 14 и GPS № 1 соответственно

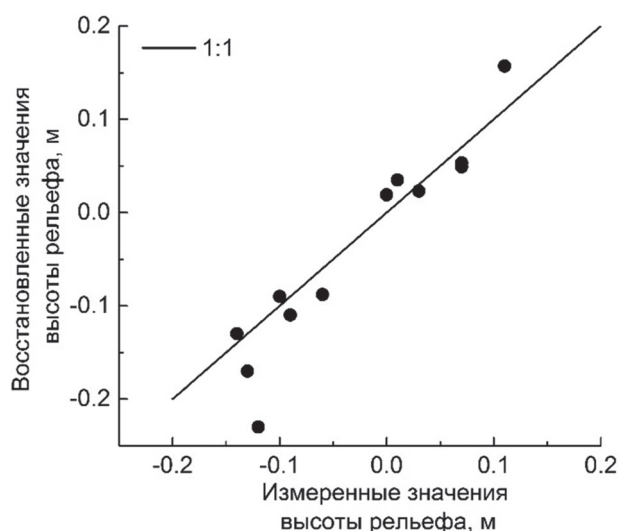


Рис. 8. Корреляция восстановленных и измеренных относительных высот поверхности почвы

Оценка среднеквадратического отклонения и коэффициента корреляции для значений высоты, восстановленных с помощью сигналов ГНСС, относительно данных геодезических измерений даёт величины 0,04 м и 0,87 соответственно, что соответствует 10 % от максимального перепада высот рельефа на площадке измерений.

Заключение

В данной работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование принципиальной возможности восстановления рельефа и влажности поверхности почвенного покрова с использованием сигналов глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS. Теоретическое моделирование и натурные измерения проводилось для участков сельскохозяйственных почв, характерных для Красноярского края. В ходе теоретического моделирования показана возможность восстановления изменений высоты и влажности поверхности почвенного покрова вдоль траектории центра эффективной площадки зондирования. Предложенный метод экспериментально апробирован в ходе полевых измерений с использованием приёмника сигналов ГЛОНАСС и GPS МРК-32Р («НПО «Радиосвязь», Красноярск). В данном эксперименте был восстановлен рельеф поверхности почвы со среднеквадратичной погрешностью 0,04 м. Созданная методика может быть использована для пространственного мониторинга пологих крупномасштабных неровностей и влажности поверхности почвенного покрова с помощью приёмников сигналов ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы П.12.1. «базовых» фундаментальных исследований СО РАН, теоретические оценки возможности измерения пространственных вариаций влажности поверхности почвы выполнены в рамках проекта РФФИ № 18-05-00405а.

Литература

1. Мironov В. Л., Михайлов М. И., Музалевский К. В., Сорокин А. В. Измерение влажности почвы сельскохозяйственных полей с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 230–243.
2. Arroyo A. A. Master Thesis: Water surface monitoring using GNSS-R Opportunity Signals. European Master of Research on Information and Communication Technologies. 2012. 104 p.
3. Arroyo A. A. Contributions to Land, Sea, and Sea-Ice Remote Sensing Using GNSS-Reflectometry: PhD Thesis. Universitat Politecnica de Catalunya, 2016. 424 p.
4. Beckman P., Spizzichino A. The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Elmsford, N. Y.: Pergamon, 1963. 503 p.
5. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V. Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009. V. 47. No. 7. P. 2059–2070.
6. Zavorotny V. U., Gleason S., Cardella E., Camps A. Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2014. V. 2. No. 4. P. 8–45.

Possibilities of bistatic radiolocation of spatial variations of soil moisture and topography of soil surface based on GLONASS and GPS signals

K. V. Muzalevskiy, M. I. Mikhailov, V. L. Mironov

L. V. Kirensky Institute of Physics SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: rsdkm@ksc.krasn.ru

In this paper, we propose a method for remote sensing of spatial variations in the topography and moisture of soil surface based on recording of interference of global navigation satellite systems (GNSS) signals GLONASS and GPS near the surface of soil. The proposed technique is based on the dependence of the instantaneous values of amplitude and phase of interference diagram of GNSS signals from soil moisture and local height of soil surface along the trajectory of footprint center as the GNSS satellite rises above the horizon. In the course of theoretical modeling, the possibility of retrieving spatial height and moisture profiles of soil surface from interference diagrams of GNSS signals recorded at a frequency of L1 (~1.6 GHz) is shown. The root-mean-square error between the retrieved and given values of spatial height and moisture profiles of the soil surface was not more than 0.3 cm and 0.006 cm³/cm³, respectively. The proposed technique was tested during experiment on field measurement from interference diagrams of GNSS signals recorded at an agricultural field in vicinity of Krasnoyarsk. The root-mean-square error and the correlation coefficient between the retrieved values of the relief heights relative to contact measured, appeared to be of 0.04 m and 0.87, respectively.

Keywords: global navigation satellite systems, GLONASS, GPS, reflectometry, soil moisture, topography

Accepted: 01.08.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-75-82

References

1. Mironov V. L., Mikhailov M. I., Muzalevskiy K. V., Sorokin A. V., Izmerenie vlazhnosti pochvy sel'skokozyaistvennykh polei s ispol'zovaniem signalov GLONASS i GPS (Measuring soil moisture of agricultural fields using GLONASS and GPS data), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 230–243.
2. Arroyo A. A., *Master Thesis: Water surface monitoring using GNSS-R Opportunity Signals*, European Master of Research on Information and Communication Technologies, 2012, 104 p.

3. Arroyo A. A., *Contributions to Land, Sea, and Sea-Ice Remote Sensing Using GNSS-Reflectometry*, Universitat Politecnica de Catalunya: PhD Thesis, 2016, 424 p.
4. Beckman P., Spizzichino A., *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Elmsford, New York: Pergamon, 1963, 503 p.
5. Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V., Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, No. 7, pp. 2059–2070.
6. Zavorotny V. U., Gleason S., Cardellach E., Camps A., Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, Vol. 2, No. 4, pp. 8–45.