

## Измерение толщины льда на пресноводном пруде и реке с использованием сигналов ГЛОНАСС и GPS

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

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

В данной работе проводится экспериментальное исследование принципиальной возможности измерения толщины ледового покрова на пресных водоемах на основе интерференционных диаграмм, создаваемых сигналами навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS. Интерференционные диаграммы регистрируются с помощью серийно выпускаемого приемника МРК-32Р, который оборудован антенной с правой круговой поляризацией. Приведены оценки погрешностей определения толщины ледового покрова. Измерения интерференционных диаграмм сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS производились на пруде и протоке реки, расположенных в черте г. Красноярска в зимний период в ходе двух сеансов 3 февраля и 20 марта 2015 г. соответственно. Установлено, что в среднем погрешности измерения толщины ледового покрова из интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS близки между собой и не превышают 0,03 м при вариации толщины ледового покрова от 0,66 м до 0,70 м. Проведенные исследования показывают принципиальную возможность и перспективность измерения толщины ледового покрова на основе сигналов ГЛОНАСС и GPS.

**Ключевые слова:** интерферометрия, толщина льда, ГЛОНАСС, GPS

*Одобрена к печати: 20.03.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-167-174*

### Введение

В последнее десятилетие широкое развитие получил метод рефлектометрии на основе сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС-Р) (Rodriguez-Alvarez et al., 2011). Принцип метода ГНСС-Р заключается в следующем. При размещении антенны приемника сигналов ГНСС на некоторой высоте над поверхностью почвы регистрируется интерференционная диаграмма, которая возникает в приемной антенне в результате сложения поля прямой волны, распространяющейся от спутника ГНСС к антенне, с полем волны, отраженной от подстилающей поверхности (почва; снег; водные объекты, покрытые ледовым и снежным покровом). Характеристики интерференционной диаграммы (ИД), в виде зависимости амплитуды интерференционного сигнала от угла возвышения спутника ГНСС, определяются электрофизическими свойствами подстилающей поверхности, локальным рельефом площадки зондирования, прилегающей к точке установки антенны. В зарубежной и отечественной литературе на основе метода ГНСС-Р широко изучаются возможности измерения влажности почвы (Larson et al., 2010, 2008; Alonso-Arroyo et al., 2014; Миронов и др., 2014), высоты сельскохозяйственных посевов и биомассы растительности (Миронов и др., 2014; Rodriguez-Alvarez, 2009), лесов (Ferrazzoli et al., 2011), толщины снежного покрова над мерзлыми почвами (Nievinski, Larson, 2014a, 2014b; Rodriguez-Alvarez et al., 2012; Jacobson, 2014). Однако в литературе слабо изучена возможность измерения толщины ледового покрова на пресных водоемах и реках. Вместе с тем мониторинг толщины ледового покрова в восточной части России является важной задачей по предотвращению и прогнозированию паводковой ситуации на реках, оценке безопасности автомобильных дорог на ледовых переправах, равно как и мониторинг и про-

гнозирование режимов установления и таяния ледового покрова в рамках программ регионального наблюдения за климатом.

В одной из последних зарубежных работ (Jacobson, 2015) автором проведены исследования по измерению толщины ледового покрова ( $0,39 \pm 0,01$  м) пресного водоема с использованием приемника Trimble Lassen LP сигналов GPS, оборудованного антенной с правой круговой поляризацией. Метод восстановления толщины ледового покрова основан на решении задачи минимизации между измеренными рассчитанными ИД сигналов GPS. При расчете ИД сигналов GPS использовалась когерентная модель для коэффициента отражения слоистой среды, при этом не учитывалось наличие снежного покрова, шероховатость границ ледового покрова, а диэлектрическая проницаемость льда рассчитывалась с использованием модели (Matzler, Wegmuller, 1987). В результате обработки трех ИД сигналов GPS восстановленные значения толщины льда варьировались от 22,4 см до 38,0 см. Столь малую точность автор объясняет вариациями толщины льда в месте площадки зондирования и влиянием снежного покрова, который не учитывался в теоретической модели ИД сигналов GPS.

В отличие от существующих зарубежных работ в данной работе предлагается исследовать возможность измерения толщины льда на пресном озере с использованием как сигналов GPS, так и ГЛОНАСС, кроме того существенно увеличено количество обработанных сигналов ГНСС.

### **Тестовый участок и экспериментальная установка**

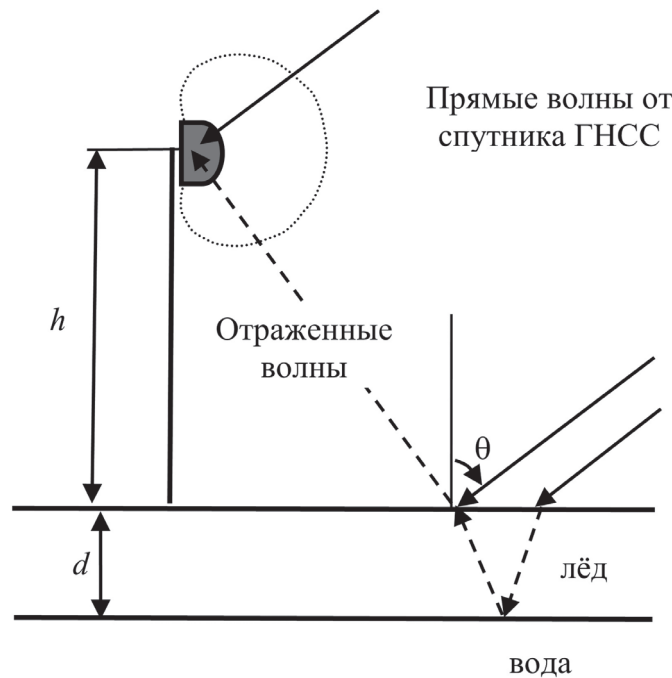
Принцип и схема измерения в данном эксперименте аналогичны ранее описанным в работе (Миронов и др., 2014). В качестве тестового участка был выбран пресноводный пруд в черте города г. Красноярск (56,0646 с.ш., 92,7331 в.д.). Пруд имеет вытянутую форму с размером 1 км на 300 м. В центре пруда устанавливался приемник сигналов ГНСС, оборудованный антенной правой круговой поляризации, размещенной на высоте 4,5 м над уровнем льда.

В качестве приемника интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS использовался автономный измерительно-регистрирующий комплекс на базе серийного комплекта МРК-32Р производства НПО «Радиосвязь», г. Красноярск. Аппаратура МРК32-Р обеспечивает прием сигналов ГЛОНАСС и GPS при минимальном угле возвышения спутников над горизонтом 9,5 градусов. Частота кадров равна 1 Гц, точность привязки секундной метки к шкале государственного эталона времени и частоты не хуже 1 мкс. Сигналы навигационных спутников, принятые антенной, поступают через смеситель в блок МРК-11 ПрМ-16. Здесь сигналы обрабатываются и через конвертор RS-232/USB 2.0 направляются в ноутбук. С помощью специального программного обеспечения обеспечивается визуализация процесса приема и обработки сигналов, а также их запись в файлы. Процесс дальнейшей обработки и регрессионного анализа проводился в среде Originlab и Matlab.

Было проведено два цикла измерения сигналов ГНСС 03.02.2015 г. (пруд, ширина и длина площадки зондирования не менее 300 м) и 20.03.2015 г. (проток реки, ширина и длина площадки зондирования не менее 200 м), с длительностью сеансов 3,06 и 3,30 часа, в ходе которых было обработано 5 спутников ГЛОНАСС (7 GPS) и 11 спутников ГЛОНАСС и GPS соответственно. Все сеансы были проведены между 12:00 и 19:00 по местному времени. Толщина льда, измеренная с помощью бура, в трех различных точках площадки зондирования в день записи сигналов ГНСС составила  $0,66 \pm 0,01$  м и  $0,70 \pm 0,01$  м соответственно 03.02.2015 г. и 20.03.2015 г. При этом измеренные значения толщины и плотности снега составили примерно 0,07–0,08 м и  $0,3 \text{ г/см}^3$  соответственно.

### Теоретическая модель интерференционного сигнала ГНСС

Толщина ледового покрова может быть восстановлена из измеренной приемником ГНСС интерференционной диаграммы с использованием теоретической модели, описывающей сложение прямой и отраженной от слоистой среды «вода – ледовый покров – воздух» волн в точке расположения приемной антенны. Геометрия задачи изображена на *рис. 1*.



*Рис. 1. Многолучевое распространение волн от спутников ГНСС при расположении приемной антенны (ориентированной на горизонт) приемника ГНСС на высоте  $h$  над ледовым покровом толщиной  $d$ .  $\theta$  – угол падения,  $\alpha$  – угол возвышения спутника ГНСС,  $\theta = 90^\circ - \alpha$*

Учитывая требования постоянства мощности сигнала ГНСС на поверхности Земли, которое предъявляется к системам GPS и ГЛОНАСС при любом положении спутника на небесной сфере, будем считать, что изменения амплитуды принимаемого сигнала ГНСС при увеличении угла возвышения спутника определяются только диаграммой направлен-

ности приемной антенны и интерференцией прямой и отраженной волн от слоистой среды «вода – ледовый покров – воздух». Диаграмму направленности антенны правой круговой поляризации будем считать функцией  $F(\theta) = p_0 + p_1\theta + p_2\theta^2$ . Тогда амплитуда сигнала  $U(\theta)$ , регистрируемая приемником ГНСС, оснащенного антенной с правой круговой поляризацией, может быть описана следующей формулой (Rodriguez-Alvarez et al., 2011):

$$U(\theta) = F(\theta) \cdot \left| 1 + \frac{R_H(\theta) + R_V(\theta)}{2} e^{2ik_0 h \cos \theta} \right|, \quad (1)$$

где  $R_H(\theta)$  и  $R_V(\theta)$  – когерентные составляющие коэффициента отражения от слоистой среды «вода – лед – воздух»;  $\theta$  – угол падения волны на поверхность слоистой среды;  $h$  – эффективная высота фазового центра антенны над ледовым покровом;  $k_0 = \omega/c$  – волновое число свободного пространства;  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота электромагнитного поля, излучаемая спутником ГНСС. Будем рассматривать ледовый покров в виде однородного диэлектрического слоя на воде, пренебрегая в нем явлениями дифракции и рассеяния волн. Обозначим через  $\epsilon_g$  и  $\epsilon_n$  относительные комплексные диэлектрические проницаемости воды и льда соответственно. Комплексный коэффициент отражения от слоистой среды «вода – лед – воздух» для плоских волн с горизонтальной  $R_H(\theta)$  и вертикальной  $R_V(\theta)$ , поляризациями можно рассчитать по формуле (Larson et al., 2010):

$$R_{H,V}(\theta) = \frac{r_{n,H,V}(\theta) + r_{g,H,V}(\theta) e^{2ik_0 d w_n}}{1 + r_{n,H,V}(\theta) r_{g,H,V}(\theta) e^{2ik_0 d w_n}}, \quad (2)$$

где  $r_{n,H,V}(\theta)$  и  $r_{g,H,V}(\theta)$  – коэффициенты отражения Френеля от границы «воздух – лед» и «лед – вода»,  $w_n = \sqrt{\epsilon_n - \sin^2(\theta)}$  – волновое число в слое льда,  $d$  – высота ледового покрова. Коэффициенты отражения Френеля  $r_{n,H,V}(\theta)$  и  $r_{g,H,V}(\theta)$  рассчитываются по формулам:

$$r_{n,V}(\theta) = \frac{\epsilon_n \cos \theta - \sqrt{\epsilon_n - \sin^2 \theta}}{\epsilon_n \cos \theta + \sqrt{\epsilon_n - \sin^2 \theta}}, \quad r_{g,V}(\theta_1) = \frac{\epsilon_g \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_n} \sqrt{\epsilon_g - \epsilon_n \sin^2 \theta_1}}{\epsilon_g \cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon_n} \sqrt{\epsilon_g - \epsilon_n \sin^2 \theta_1}}, \quad (3)$$

$$r_{n,H}(\theta) = \frac{\cos \theta - \sqrt{\epsilon_n - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\epsilon_n - \sin^2 \theta}}, \quad r_{g,H}(\theta_1) = \frac{\epsilon_n \cos \theta_1 - \sqrt{\epsilon_g - \epsilon_n \sin^2 \theta_1}}{\epsilon_n \cos \theta_1 + \sqrt{\epsilon_g - \epsilon_n \sin^2 \theta_1}}, \quad (4)$$

$\theta_1 = \arcsin(\sin \theta / \sqrt{\epsilon_n})$ . Частота электромагнитных волн, излучаемых спутниками ГЛОНАСС, рассчитывается по формуле:  $f = 1602 \text{ МГц} + n \times 0,5625 \text{ МГц}$ , где  $n$  – это номер частотного канала ( $n = -7, \dots, 6$ ), спутники GPS излучают электромагнитные волны на фиксированной частоте:  $f = 1575,42 \text{ МГц}$ . При расчетах диэлектрическая проницаемость воды и льда задавались соответственно  $\epsilon_g = 82 + i2,5$  и  $\epsilon_n = 3,2 + i0$  (Matzler, Wegmuller, 1987; Финкельштейн и др., 1994).

## Восстановление толщины ледового покрова из измерений интерференционных диаграмм сигналов ГНСС

Метод восстановления толщины ледяного покрова  $d$  с использованием сигналов ГНСС основан на решении задачи минимизации между измеренной  $U^o(\theta)$  и рассчитанной  $U^m(\theta, p_0, p_1, p_2)$  интерференционными диаграммами сигналов ГНСС с применением алгоритма Левенберга – Марквардта:

$$Q = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |U^o(\theta_i) - U^m(\theta_i, h, d, p_0, p_1, p_2)|^2}, \quad (5)$$

где  $\theta_i$  – дискретный угол падения волны, на котором измерялись амплитуды сигнала ГНСС. Аналогично работе (Миронов и др., 2014) был выбран оптимальный диапазон углов наблюдения ИД  $60^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$  ( $10^\circ \leq \alpha_i \leq 40^\circ$ ), в пределах которых измеренные ИД отклонялись от теоретической модели (1)–(4) с наименьшим среднеквадратичным отклонением. В результате задача минимизации сводится к нахождению следующих параметров: высота фазового центра приемной антенны  $h$ , толщины ледяного покрова  $d$ , и параметров  $p_0, p_1, p_2$ , определяющих диаграмму направленности антенны.

В качестве примера на *рис. 2* приведены измеренные и рассчитанные интерференционные диаграммы сигналов ГНСС с использованием модели (1)–(5), при оптимально найденных параметрах задачи.

Восстановленные значения толщины льда из интерференционных диаграмм сигналов (см. *рис. 2*) для 03.02.2015 г. (ГЛОНАСС № 10 и GPS № 1) и 20.03.2015 г., (ГЛОНАСС № 7 и GPS № 11) оказались равны (0,69 м и 0,68 м) и (0,69 м и 0,72 м) соответственно. Наблюдаемые амплитудные различия и отличие в периоде колебаний между измеренными и рассчитанными ИД могли возникнуть за счет локальных неоднородностей как по толщине ледового покрова, так и за счет влияния снега на участке местности, по которому перемещаются эллипсы зондирования (первая зона Френеля). Для всех полученных интерференционных диаграмм спутников ГЛОНАСС и GPS, которые наблюдались в процессе сеансов от 3 февраля и 20 марта в 2015 году, усредненные восстановленные значения толщины льда с соответствующими среднеквадратичными отклонениями оказались равны  $0,70 \pm 0,02$  м (GPS),  $0,68 \pm 0,01$  м (ГЛОНАСС) и  $0,71 \pm 0,03$  м (GPS),  $0,69 \pm 0,02$  м (ГЛОНАСС) соответственно. Согласно проведенному анализу среднеквадратичные отклонения средних толщин ледового покрова, восстановленных с помощью спутников ГЛОНАСС и GPS от средних толщин ледового покрова, измеренных на месте, не превышают 3 см. Данная погрешность измерений может быть достигнута только при проведении более 5–10 отдельных сеансов регистрации интерференционных диаграмм. С учетом одновременного приема сигналов ГЛОНАСС и GPS необходимое для этого время может составлять порядка 3 часов.

Достигнутая погрешность измерения толщины ледового покрова с помощью аппаратуры МРК-32Р, принимающей сигналы ГЛОНАСС и GPS, соответствует нижней границе погрешностей, полученных в работе (Jacobson, 2015).

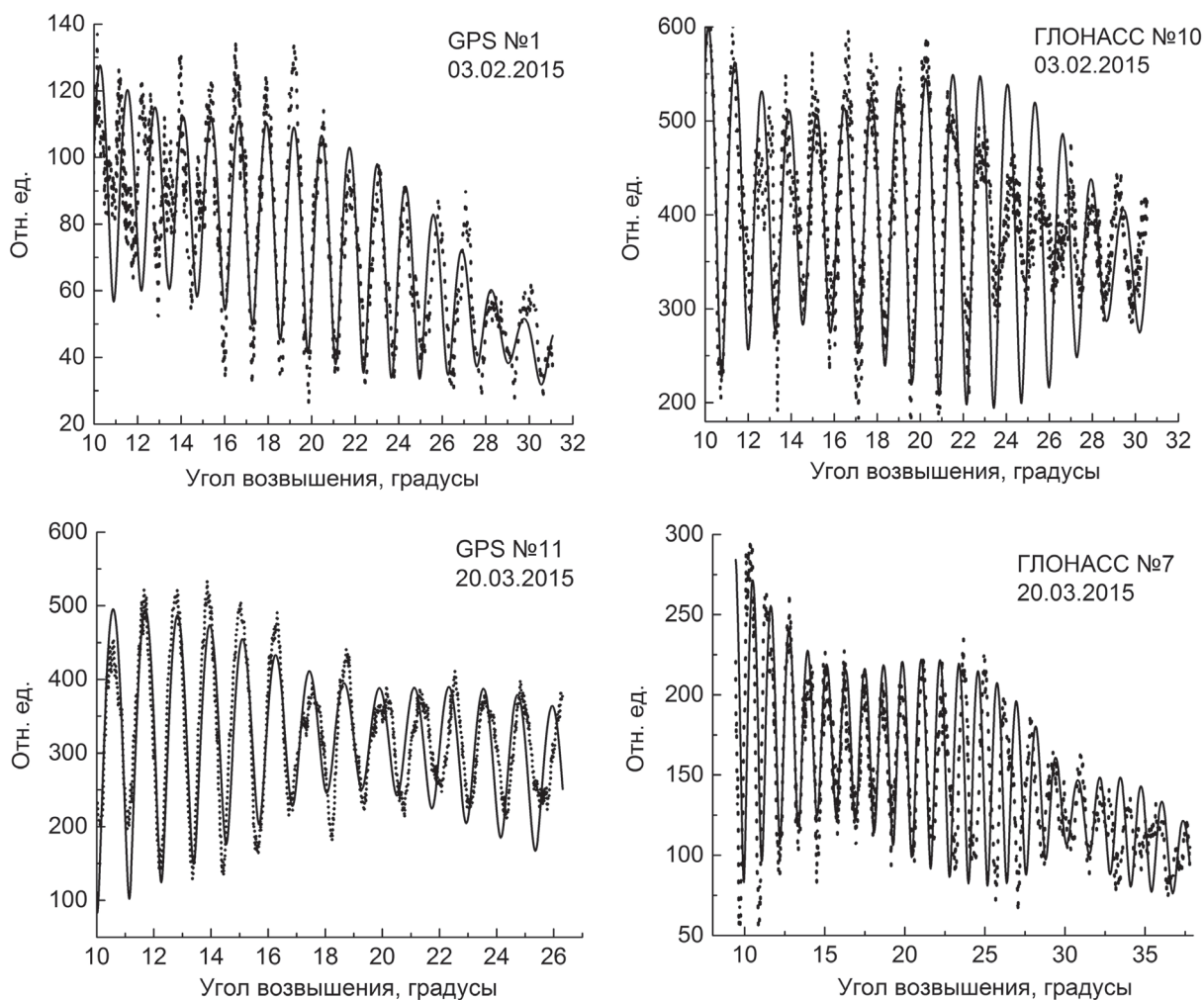


Рис. 2. Интерференционные диаграммы сигналов ГЛОНАСС и GPS, измеренные в сеансах от 03.02.2015 г. и 20.03.2015 г. Точками и сплошными линиями показаны значения интерференционного сигнала, измеренные и рассчитанные из теоретической модели (1)-(4), (5), соответственно

### Заключение

В данной работе экспериментально найдены погрешности измерения толщины ледового покрова на основе использования сигналов спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. При этом использовалась серийная отечественная приемная аппаратура МРК-32Р производства ОАО НПО «Радиосвязь», г. Красноярск.

Установлено, что в среднем погрешность измерения толщины ледового покрова не превышает 0,03 м, данная погрешность была получена при сравнении данных зондирования толщины ледового покрова с наземными измерениями толщины льда в пределах площадки зондирования. Достигнутая погрешность открывает перспективы разработки технологии дистанционного зондирования толщины ледовых покровов на пресноводных водоемах и создает основу для разработки специализированных устройств льдо-толщинометров, которые могут быть использованы при мониторинге ледовой обстановки на реках, переправах, а также на метеостанциях для автоматического мониторинга режима процессов льдообразования и таяния.



## Литература

1. Миронов В.Л., Михайлов М.И., Музалевский К.В., Сорокин А.В., Фомин С.В., Каравайский А.Ю. Измерение влажности и высоты посевов сельскохозяйственных полей с использованием приемника сигналов ГЛОНАСС и GPS // Вестник СибГАУ. 2014. Т. 56. № 4. С. 88–97.
2. Финкельштейн М.И., Карпунин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. Подповерхностная радиолокация. М.: Радио и связь, 1994. 216 с.
3. Alonso-Arroyo A., Camps A., Aguasca A., Forte G., Monerris A., Rudiger C., Walker J.P., Park H., Pascual D., Onrubia R. Improving the Accuracy of Soil Moisture Retrievals Using the Phase Difference of the Dual-Polarization GNSS-R Interference Patterns // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11. No. 12. P. 2090–2094.
4. Ferrazzoli P., Guerriero L., Pierdicca N., Rahmoune R. Forest biomass monitoring with GNSS-R: Theoretical simulations // Advances in Space Research. 2011. Vol. 47. No. 10. P. 1823–1832.
5. Jacobson M.D. Estimating Snow Water Equivalent Estimation for a Slightly Tilted Snow-Covered Prairie Grass Field by GPS Interferometric Reflectometry // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2014. DOI: 10.1186/1687-6180-2014-61.
6. Jacobson M.D. Potential for Estimating the Thickness of Freshwater Lake Ice by GPS Interferometric Reflectometry // Journal of Geography and Geology. 2015. Vol. 7. No. 1. P. 10–19.
7. Larson K.M., Braun J., Small E.E., Zavorotny V., Gutmann E., Bilich A. GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content // IEEE J-STARS. 2010. Vol. 3. P. 91–99.
8. Larson K.M., Small E.E., Gutmann E.D., Bilich A., Braun J.J., Zavorotny V.U. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 3. P. L24405–2008.
9. Matzler C., Wegmuller U. Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies // Journal of Physics D: Applied Physics. 1987. Vol. 20. P. 1623–1630.
10. Nievinski F.G., Larson K.M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation, I: formulation and simulations // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2014a. Vol. 52. No. 10. P. 6555–6563.
11. Nievinski F.G., Larson K.M. Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation, II: application and validation // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 2014b. Vol. 52. No. 10. P. 6564–6573.
12. Rodriguez-Alvarez N. Soil moisture and vegetation height retrieval using GNSS-R techniques // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2009. P. III-869–III-872.
13. Rodriguez-Alvarez N., Camps A., Vall-llossera M., Bosch-Lluis X., Monerris A., Ramos-Perez I., Valencia E., Marchan-Hernandez J.F., Martinez-Fernandez J., Baroncini-Turricchia G., Pérez-Gutiérrez C., Sanchez N. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. Vol. 49. No. 1. P. 71–84.
14. Rodriguez-Alvarez N., Aguasca A., Valencia E., Bosch-Lluis X., Camps A., Ramos-Perez I., Vall-llossera M. Snow thickness monitoring using GNSS measurements // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2012. Vol. 9. No. 6. P. 1109–1113.

## Ice thickness measurements at freshwater lake and river using GLONASS and GPS signals

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

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

In this paper, we experimentally investigate the possibility to monitor ice thickness over freshwater objects based on measuring the interference diagrams formed by the signals of the GLONASS and GPS navigation satellites. The interference diagrams are recorded with a commercially available receiver MRC-32R which is additionally equipped with an antenna of right-hand circular polarization. The errors of ice thickness measurements derived with this technique are estimated. Measurements of interference diagrams of the GLONASS and GPS navigation satellites were conducted on freshwater lake and river situated in the urban area of Krasnoyarsk on February 3 and March 20, 2015. Errors which values were derived from interference diagrams of GLONASS and GPS signals are close to each other and do not exceed 0.03 m relative to ice thickness measured in situ. The conducted studies have shown the fundamental feasibility of measuring ice cover thickness based on GLONASS and GPS signals.

**Keywords:** interferometry, ice thickness, GLONASS, GPS

*Accepted: 20.03.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-167-174*

## References

1. Finkelshteyn M.I., Karpukhin V.I., Kutev V.A., Metelkin V.N., *Podpoverkhnostnaya radiolokatsiya* (Subsurface radiolocation), M.: Radio i svyaz, 1994, 216 p.
2. Mironov V.L., Mikhaylov M.I., Muzalevskiy K.V., Sorokin A.V., Fomin S.V., Karavayskiy A.Yu., *Izmerenie vlazhnosti i vysoty posevov sel'skokhozyaystvennykh poley s ispol'zovaniem priemnika signalov GLONASS i GPS* (Measurement of soil moisture and heights of vegetations with using of GLONASS and GPS signals), *Vestnik SibGAU*, 2014, Vol. 56. No. 4. pp. 88–97.
3. Alonso-Arroyo A., Camps A., Aguasca A., Forte G., Monerris A., Rudiger C., Walker J.P., Park H., Pascual D., Onrubia R., Improving the Accuracy of Soil Moisture Retrievals Using the Phase Difference of the Dual-Polarization GNSS-R Interference Patterns, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 11, No. 12, pp. 2090–2094.
4. Ferrazzoli P., Guerriero L., Pierdicca N., Rahmoune R., Forest biomass monitoring with GNSS-R: Theoretical simulations, *Advances in Space Research*, 2011, Vol. 47, No. 10, pp. 1823–1832.
5. Jacobson M.D., Estimating Snow Water Equivalent Estimation for a Slightly Tilted Snow-Covered Prairie Grass Field by GPS Interferometric Reflectometry, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014. DOI: 10.1186/1687-6180-2014-61.
6. Jacobson M.D., Potential for Estimating the Thickness of Freshwater Lake Ice by GPS Interferometric Reflectometry, *Journal of Geography and Geology*, 2015, Vol. 7, No. 1, pp. 10–19.
7. Larson K.M., Braun J., Small E.E., Zavorotny V., Gutmann E., Bilich A., GPS Multipath and Its Relation to Near-Surface Soil Moisture Content, *IEEE J-STARS*, 2010, Vol. 3, pp. 91–99.
8. Larson K.M., Small E.E., Gutmann E.D., Bilich A., Braun J.J., Zavorotny V.U., Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 3, pp. L24405–2008.
9. Matzler C., Wegmuller U., Dielectric properties of freshwater ice at microwave frequencies, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1987, Vol. 20, pp. 1623–1630.
10. Nievinski F.G., Larson K.M., Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation, I: formulation and simulations, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2014a, Vol. 52, No. 10, pp. 6555–6563.
11. Nievinski F.G., Larson K.M., Inverse modeling of GPS multipath for snow depth estimation, II: application and validation, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2014b, Vol. 52, No. 10, pp. 6564–6573.
12. Rodriguez-Alvarez N., Soil moisture and vegetation height retrieval using GNSS-R techniques, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009, pp. III-869–III-872.
13. Rodriguez-Alvarez N., Camps A., Vall-llossera M., Bosch-Lluis X., Monerris A., Ramos-Perez I., Valencia E., Marchan-Hernandez J.F., Martinez-Fernandez J., Baroncini-Turricchia G., Pérez-Gutiérrez C., Sanchez N., Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, Vol. 49, No. 1, pp. 71–84.
14. Rodriguez-Alvarez N., Aguasca A., Valencia E., Bosch-Lluis X., Camps A., Ramos-Perez I., Vall-llossera M., Snow thickness monitoring using GNSS measurements, *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2012, Vol. 9, No. 6, pp. 1109–1113.