

## Измерение влажности и температуры почвы на основе интерференционного приёма линейно-поляризованных сигналов ГЛОНАСС и GPS

К. В. Музалевский, М. И. Михайлов

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

В данной работе представлены результаты теоретического исследования возможностей дистанционного зондирования влажности талой сельскохозяйственной, влажности и температуры мёрзлой тундровой почв на основе измерения отношения коэффициентов отражения линейно-поляризованных волн (поляризационный индекс) из интерференционных диаграмм сигналов ГЛОНАСС и GPS, регистрируемых вблизи поверхности Земли на частотах 1,2 и 1,6 ГГц. В приближении метода Кирхгофа оценены диапазоны углов возвышения спутников над горизонтом ( $0-55^\circ$ ), в пределах которых существенна доля когерентной составляющей над диффузной при рассеянии в зеркальном направлении сигналов ГЛОНАСС и GPS шероховатой поверхностью почвенного покрова. В ходе решения прямой задачи моделировался «измеренный» поляризационный индекс отражённых волн (с добавлением случайной величины, распределённой по нормальному закону) на двух частотах 1,2 и 1,6 ГГц с использованием типичных профилей влажности и температуры естественно сложенных почв. Показано, что поляризационный индекс недостаточно чувствителен для восстановления слоистой структуры влагосодержания в талой и температуры в мёрзлой почвах на фоне шумов (1,5–2 дБ) регистрируемых интерференционных диаграмм. Обратная задача по восстановлению влажности и температуры почвы из «измеренного» поляризационного индекса решалась в приближении диэлектрически-однородного почвенного полупространства. Показано, что для всех рассмотренных профилей вне зависимости от используемой частоты сигналов максимальная погрешность восстановления влажности и температуры почвы не превышает  $0,03 \text{ см}^3/\text{см}^3$  и  $1^\circ\text{C}$  относительно соответствующих средних величин, рассчитанных для поверхностного слоя почвы 1 см.

**Ключевые слова:** глобальные навигационные спутниковые системы, ГЛОНАСС, GPS, рефлектометрия, влажность почвы, температура почвы, сельскохозяйственные почвы, арктические тундровые почвы

Одобрена к печати: 10.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-155-165

### Введение

Высокостабильные радиосигналы L-диапазона непрерывно излучаются глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС) ГЛОНАСС, GPS и в круглосуточном режиме доступны в любой точке земного шара для мониторинга геофизических параметров подстилающей поверхности. В последнее время интерферометрический приём сигналов ГНСС вблизи подстилающей поверхности нашёл широкое применение для измерения высоты волн и скорости приповерхностного ветра (Argoys, 2016), влажности почвы (Argoys et al., 2014), биомассы растительности (Zhang et al., 2017), толщины (Larson, 2016) и плотности (McCreight et al., 2014) снежного покрова и др. Эти геофизические параметры подстилающей поверхности вычисляются из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС, которые регистрируются с использованием антенн левой и правой круговых, горизонтальной и вертикальной поляризаций (Zavorotny et al., 2014). Однако до настоящего времени остаются малоизученными возможности восстановления влажности талых сельскохозяйственных почв на основе измерений отношения линейно-поляризованных сигналов ГНСС, отражённых от подстилающей поверхности на нескольких частотах из диапазона L1 ( $\sim 1,6$  ГГц) и L2 ( $\sim 1,2$  ГГц). При этом задача измерения полной влажности и температуры мёрзлой почвы на основе регистрации сигналов ГНСС в литературе не поставлена. Вместе с тем разработка дистанционных методов

мониторинга полной влажности и температуры мёрзлой тундровой почвы является весьма актуальной задачей при определении физических свойств, оценке состояния и несущих способностей мёрзлых грунтов арктических территорий.

Анализ зарубежных и отечественных научных публикаций показал, что для дистанционного зондирования влажности почвы в основном применяются сигналы ГНСС GPS поддиапазона L1, а преимущества использования более низкочастотных сигналов поддиапазона L2 малоизучены (Carreno-Luengo et al., 2015). При этом влажность почвы восстанавливается в ходе минимизации нормы невязки между измеренной и рассчитанной интерференционной диаграммами при регистрации на антенну левой круговой, горизонтальной или вертикальной поляризации (Arroyo, 2016; Zavorotny et al., 2014). Методика восстановления влажности почвы на основе измерения разности фаз между интерференционными диаграммами, записанными одновременно с использованием антенны горизонтальной и вертикальной поляризации, хотя и обладает большей точностью по сравнению с вышеописанными методами, но существенно зависит от точности определения шероховатости поверхности почвы и высоты расположения фазового центра антенны относительно рельефа местности (Arroyo et al., 2014). Относительный метод измерения отражённых сигналов ГНСС на ортогональных линейных поляризациях, предлагаемый в данной работе, лишён вышеуказанных недостатков стандартных подходов. Действительно, построенные в приближении методов малых возмущений и Кирхгофа модели бистатического радарного рассеяния указывают (Ceraldi et al., 2005) на отсутствие у отношения сечений радарного рассеяния линейно-поляризованных волн при рассеянии в зеркальном направлении (в случае доминирования когерентной составляющей над диффузной) зависимости от статистических свойств неровностей поверхности почвенного покрова. Выполненные ранее в работе (Zavorotny, Voronovich, 2000) теоретические оценки показали, что при вариации влажности талой почвы от 0,05 до 0,3 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> именно величина отношения коэффициентов отражения волн на вертикальной и горизонтальной поляризации испытывает существенно большее изменение (примерно на 15–20 дБ) по сравнению с отношением коэффициентов отражения, измеренных на ортогональных круговых поляризациях. Кроме того, предложенная ранее в работе (Mironov, Muzalevskiy, 2012) методика восстановления коэффициентов отражения из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС позволяет совместно с описанным в данной работе подходом — регистрацией отношения линейно-поляризационных сигналов — предложить новый метод измерения влажности и температуры почвы, минимизирующий влияние шероховатости поверхности почвенного покрова, биомассы растительности (в случае если можно пренебречь рассеянием волны на элементах растений, а экспоненциальное затухание плоской волны при распространении в растительном покрове является доминирующим), неточности определения высоты положения фазового центра антенны над рельефом местности. В целом проведённый анализ показал, что в настоящее время разработка научных основ информационной технологии дистанционного зондирования влажности почвы сельскохозяйственных полей, а также полной влажности и температуры мёрзлых тундровых почв на основе поляриметрических измерений сигналов ГЛОНАСС и GPS в частотном диапазоне L1 и L2 на горизонтальной и вертикальной поляризациях является актуальной задачей.

## Модель интерференции сигналов ГНСС

В связи с тем, что источники сигналов ГНСС удалены от поверхности Земли на значительное расстояние (порядка 20 000 км), падающие на приёмную антенну и отражённые от почвенного покрова волны можно считать плоскими. По мере движения спутников ГНСС по небосводу будем считать, что уровень излучаемой ими мощности у поверхности Земли остаётся практически постоянным, варьируясь в пределах от –159 до –161 дБВт (GLONASS..., 2008), а измеряемая мощность сигналов ГНСС на выходе приёмника определяется диаграммой направленности приёмной антенны и характером интерференции прямой и отражённых от почвенного покрова волн.

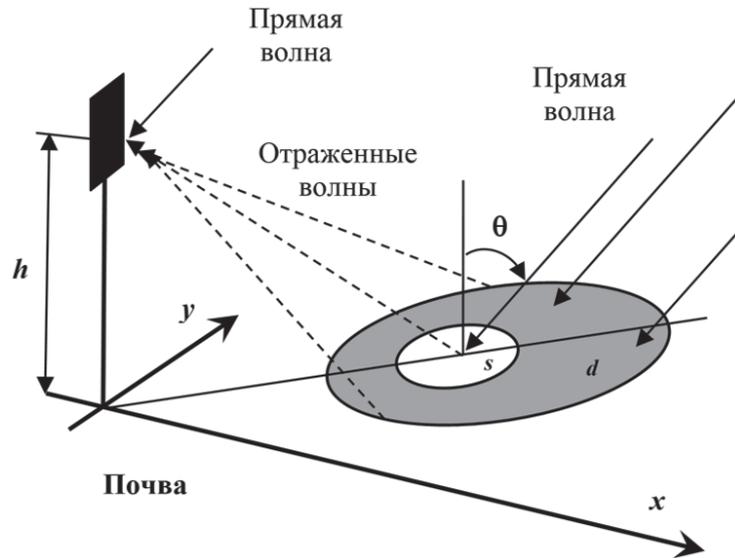


Рис. 1. Геометрия задачи:  $\theta$  — угол падения электромагнитной волны на поверхность почвы в область зеркального отражения ( $s$ ), которая совпадает с первой зоной Френеля; область диффузного рассеяния обозначена символом  $d$

Рассмотрим приёмник сигналов ГНСС, оборудованный антенной вертикальной и горизонтальной поляризации, фазовый центр которой расположен на высоте  $h$  над шероховатой поверхностью не покрытого растительностью почвенного покрова (рис. 1). Мощность сигнала ГНСС относительно шума на выходе приёмника может быть представлена в виде суммы мощности прямого, зеркально отражённого (когерентного) и диффузно рассеянного (некогерентного) сигналов в виде:

$$P_{H,V}(\theta) = F(90^\circ - \theta) \left[ 1 + r_s^2 |R_{H,V}|^2 + 2r_s |R_{H,V}| \cos(2k_0 h \cdot \cos(\theta) + \varphi_{H,V}) + r_d^2 |R_{H,V}|^2 \right], \quad (1)$$

где  $\theta$  — угол падения электромагнитной волны на поверхность почвы (см. рис. 1);  $F(90^\circ - \theta)$  — коэффициент усиления приёмных трактов приёмника, включающего угловые свойства диаграммы слабонаправленной антенны (в общем виде зависит также от азимутального угла);  $k_0 = \omega/c$  — волновое число свободного пространства;  $c$  — скорость света в вакууме;  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  — частота электромагнитных волн, излучаемых спутниками ГНСС (примерно равная 1,6 и 1,2 ГГц в частотных диапазонах L1 и L2–L5 соответственно);  $R_{H,V}$  — комплексный коэффициент отражения электромагнитной волны на горизонтальной ( $H$ ) и вертикальной ( $V$ ) поляризации в воздушное пространство от слоисто-неоднородного почвенного покрова;  $\varphi_{H,V}$  — фаза соответствующих коэффициентов отражения;  $r_s$  и  $r_d$  — среднеквадратические значения случайной величины, характеризующей ослабление коэффициента отражения за счёт когерентного и диффузного рассеяния волны на статистически неровной поверхности почвы. Оценки для  $r_s$  и  $r_d$  ранее были получены в работе (Beckman, Spizzichino, 1963) на основе приближения Кирхгофа (в форме скалярной аппроксимации поля). Данное приближение справедливо, если радиус кривизны неровностей поверхности почвы значительно больше длины волны (длина корреляции больше, чем длина волны) и среднеквадратическое отклонение (СКО) высот неровностей поверхности почвы  $\sigma_h$  меньше чем  $\lambda/6$ ,  $\lambda$  — длина волны. Расчёты, проведённые на основе приближения Кирхгофа (Beckman, Spizzichino, 1963) для когерентной и диффузной мощности рассеянной шероховатой поверхностью волны, высоты неровностей которой распределены по нормальному закону, дают соотношения между значениями  $r_s$  и  $r_d$ , изображённые на рис. 2 (см. с. 158). При увеличении  $\sigma_h$  и при уменьшении угла падения волны (увеличение угла восхождения,  $\psi = 90 - \theta$ , спутников ГНСС) когерентная составляющая быстро спадает, а диффузная увеличивается, насыщаясь на уровне около 0,4 (см. рис. 2).

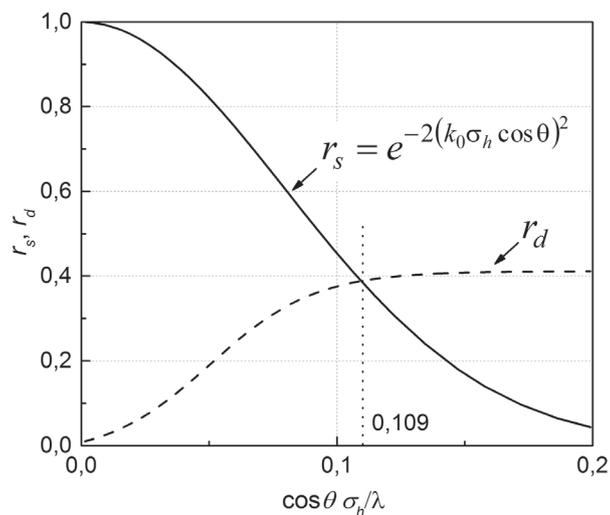


Рис. 2. Соотношение между среднеквадратическими значениями коэффициента рассеяния когерентной ( $r_s$ ) и диффузной ( $r_d$ ) составляющих при отражении плоской волны от шероховатой поверхности

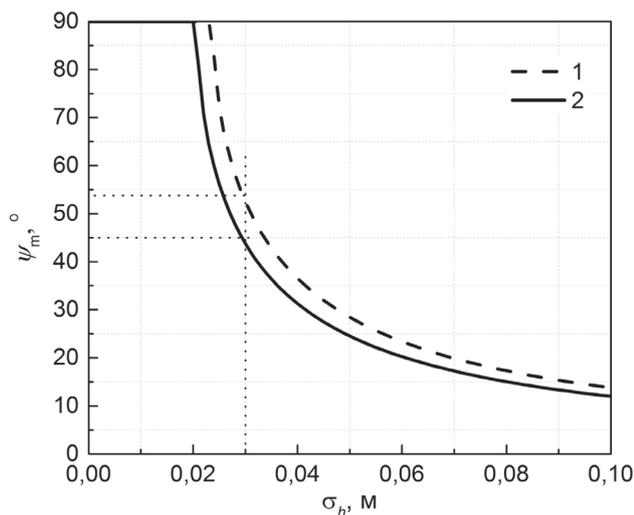


Рис. 3. Максимальный угол возвышения спутника ГНСС над горизонтом в зависимости от СКО высот неровностей поверхности почвы: 1 — расчёт по формуле Рэля; 2 — расчёт по критерию на основе модели Кирхгофа

Используя критерий Рэля  $8\sigma_h \cdot \cos\theta < \lambda$  (максимальная разность фаз между рассеянными лучами менее  $\pi/2$ ) и принимая в качестве критерия  $\sigma_h \cdot \cos\theta = 0,109\lambda$ , при котором наблюдается равенство коэффициентов рассеяния когерентной и диффузной составляющих (см. рис. 2), оценим максимальный угол возвышения спутника ГНСС над горизонтом, при превышении которого интерференционная картина будет разрушаться в силу увеличивающейся доли диффузного рассеяния в ущерб когерентной составляющей (рис. 3). В качестве предельных значений примем  $\sigma_h \approx 3,0$  см — эта величина характерна для вспаханной почвы без боронования (Egido et al., 2014) или для тундровой подстилающей поверхности (Watanabe et al., 2012). Из характера зависимости, приведённой на рис. 3, видно, что два критерия близки друг к другу и при  $\sigma_h \approx 3,0$  см в диапазоне углов возвышения спутников ГНСС над горизонтом от 0 до 45–55° будет сохраняться максимальная когерентность регистрируемой интерференционной диаграммы. Приведённые оценки указывают, что предложенный метод будет применим для СКО неровностей поверхности почвы не более чем 3 см при регистрации интерферограмм сигналов ГНСС в диапазоне углов возвышения спутников от 0 до 45–55°. На основе данного критерия, как отмечается в статье, для типичных величин СКО высот неровностей поверхности почвы 3 см диапазон углов возвышения спутников при записи интерферограммы должен быть в пределах от 0 до 45–55°, в этом случае диффузная компонента не превысит зеркальную.

При этом высота расположения антенны над почвенным покровом должна быть много меньше, чем 150 и 300 м соответственно в случае сигналов ГНСС GPS и ГЛОНАСС в частотных диапазонах L1C–L2C. В противном случае не будут выполняться условия когерентности для принимаемых сигналов (длина когерентности  $c\tau_c$ , где  $\tau_c$  — время когерентности, приблизительно равна  $1/1,023$  Мбит/с = 293 м для GPS и  $1/511$  кбит/с = 587 м для ГЛОНАСС, в знаменатели дроби указана скорость передачи псевдослучайного дальномерного кода). В случае использования P-кода, а также новых сигналов L5C GPS или сигналов L3OC ГЛОНАСС длина когерентности уменьшается до ~30 м. На основе сказанного выше интерпретацию интерференционных диаграмм сигналов ГНСС проведём в диапазоне углов возвышения спутников от 5 до ~60°. При этом будем пренебрегать изменениями уровня собственных шумов, наводимых в приёмнике за счёт диффузного рассеяния волн на шероховатой поверхности почвенного покрова (см. рис. 1, область d), и учтём лишь зеркально отражённую волну, сформированную преимущественно в области первой зоны Френеля (см. рис. 1, область s). Далее сведём

задачу о регистрации интерференционной диаграммы, которая описывается формулой (1), к измерению непосредственно коэффициентов отражения на горизонтальной и вертикальной поляризации с использованием поляриметрического приёмника сигналов ГЛОНАСС и GPS. Следуя методике, изложенной в работе (Mironov, Muzalevskiy, 2012), запишем уравнения для верхней ( $P_{p,up}$ ) и нижней ( $P_{p,low}$ ) огибающих интерференционной диаграммы (1) в следующем виде:

$$P_{p,up}(\theta) = F(90^\circ - \theta) \left[ 1 + r_s |R_p| \right]^2, \quad P_{p,low}(\theta) = F(90^\circ - \theta) \left[ 1 - r_s |R_p| \right]^2, \quad (2)$$

здесь  $p = H$  или  $p = V$ . Решая систему уравнений (2) для каждой поляризации относительно коэффициента отражения, получим:

$$|R_p| r_s = \frac{\sqrt{P_{p,up}(\theta)/P_{p,low}(\theta)} - 1}{\sqrt{P_{p,up}(\theta)/P_{p,low}(\theta)} + 1}. \quad (3)$$

Исследуем возможности восстановления влажности и температуры почвы из отношения коэффициентов отражения  $PRI = |R_V|^2 / |R_H|^2$  (далее — поляризационный индекс) на основе регистрации интерференции сигналов ГНСС вблизи подстилающей поверхности.

### Измерение влажности талой почвы на основе регистрации отношения линейно-поляризованных сигналов ГНСС

Рассмотрим возможности дистанционного зондирования влажности талой почвы на основе измерения в частотных диапазонах L1 (1,6 ГГц) и L2–L5 (1,2 ГГц) поляризационного индекса сигналов ГНСС, отражённых от непокрытой растительностью почвы, в случае типичных профилей влажности (рис. 4, см. с. 160). На основе диэлектрической модели (Mironov et al., 2009) и итерационного подхода (Brekhovskikh, 1960), который применялся для вычислений коэффициентов отражения от почвы с произвольной слоистой неоднородностью диэлектрической проницаемости, был рассчитан поляризационный индекс  $PRI$  на частоте 1,6 и 1,2 ГГц (рис. 5, см. с. 160). Угловые зависимости  $PRI$  (см. рис. 5) являются характеристическими для профилей влажности 1–3 и позволяют однозначно идентифицировать каждый из них. Для группы профилей влажности 4–6 (см. рис. 5) угловая зависимость  $PRI$  характеристической является лишь в узком диапазоне углов (в районе угла Брюстера), в котором только по изменению амплитуды  $PRI$  можно измерить величину влажности почвы и идентифицировать вид профиля влажности почвы. Вместе с тем при переходе от частоты 1,6 ГГц к частоте зондирования 1,2 ГГц максимальные изменения значений  $PRI$  достигают 2 дБ в районе углов Брюстера. (Характер угловых зависимостей на рис. 5 говорит о том, что коэффициент отражения на горизонтальной поляризации практически не меняется при переходе между профилями 4–6, а изменения  $PRI$  обеспечиваются за счёт вертикальной поляризации.) Практически наблюдаемый уровень зашумленности интерференционного сигнала ГНСС порядка 1–2 дБ (СКО случайных вариаций амплитуды интерференционного сигнала) превышает уровень изменчивости  $PRI$  при переходе от частоты от 1,6 к 1,2 ГГц и не позволяет проводить восстановления профилей влажности почвы даже в случае относительно малых влажностей (см. рис. 5). Действительно, вариации зашумлённого интерференционного сигнала, рассчитанные по формуле (1) с добавлением случайной величины, распределённой по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением 1,5 дБ, не позволяют отличить изменчивость влажности почвы с глубиной для профилей 4–6 (см. рис. 4 и 6, с. 160). Отметим, что рассчитанные подобным образом сигналы ГНСС при дальнейшем моделировании и восстановлении параметров задачи дополнительно не усреднялись. Оценим толщину поверхностного слоя неоднородной почвы, средняя влажность в котором будет соответствовать влажности почвы в модельном представлении однородного полупространства, для чего выберем наиболее низкую частоту 1,2 ГГц сигналов ГНСС.

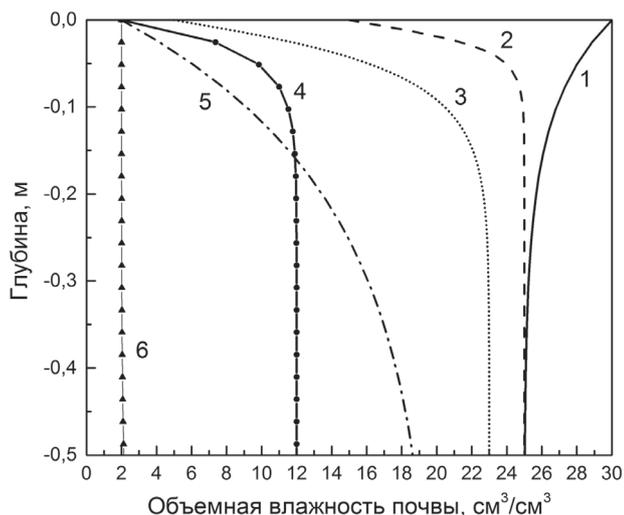


Рис. 4. Типичные профили влажности в песчаной почве, которые наблюдались в эксперименте лаборатории JPL NASA летом 1975 г. (Njoku, Kong, 1977)

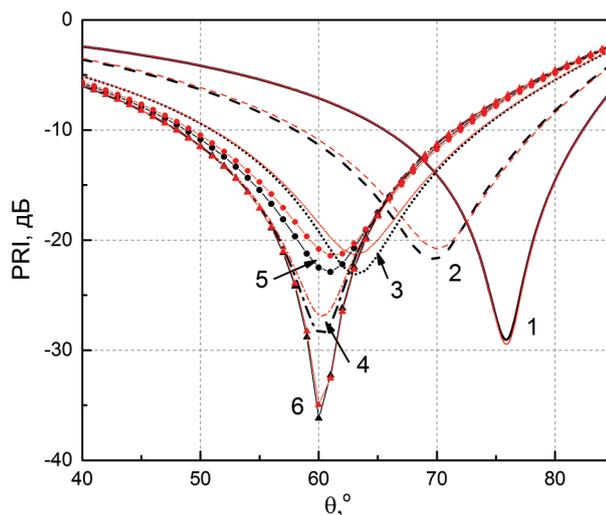


Рис. 5. Поляризационный индекс в зависимости от угла падения волны, рассчитанный для различных профилей (отмечены цифрами на рис. 3) и частот: красная линия — 1,2 ГГц; чёрная линия — 1,6 ГГц

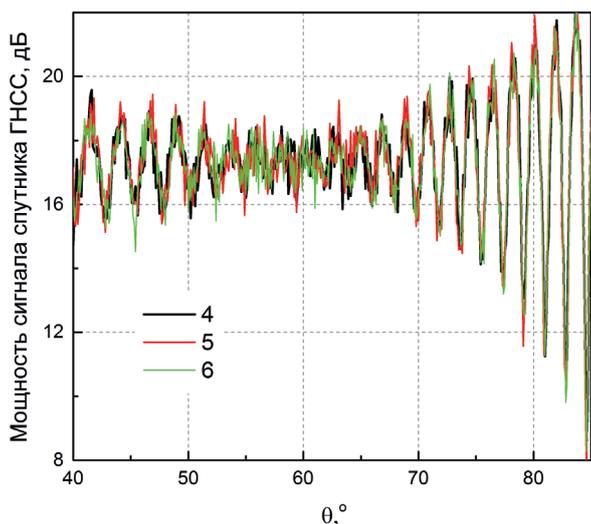


Рис. 6. Интерференционная картина сигналов ГНСС, рассчитанная на частоте 1,2 ГГц для антенны вертикальной поляризации в случае профилей 4–6, изображённых на рис. 4

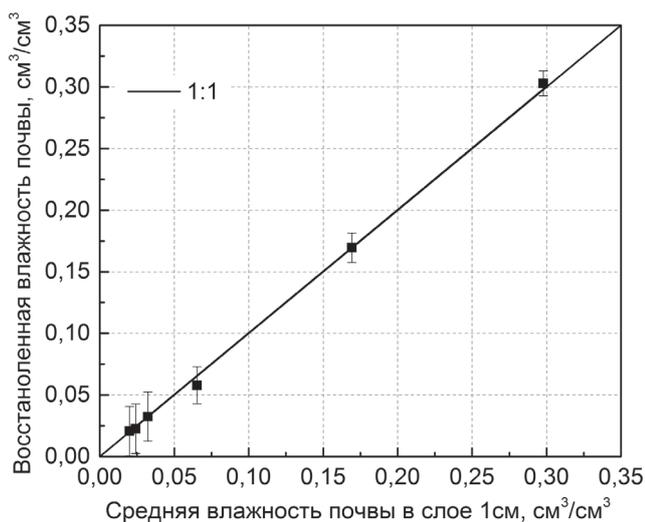


Рис. 7. Восстановленные значения влажности почвы в приближении однородного полупространства в зависимости от средней влажности неродной почвы в слое 0–1 см

Восстановим влажность слоисто-неоднородной почвы в приближении однородного полупространства. Для этого решим задачу минимизации нормы невязки между значениями  $PRI$ , рассчитанными (с добавлением случайной величины, распределённой по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением 1,5 дБ) для профилей влажности почвы, изображённых на рис. 4, и значениями  $PRI$ , рассчитанными для однородного полупространства. Оказалось, что восстановленные значения влажности почвы для всех профилей с наибольшим коэффициентом корреляции 0,999 и с наименьшей среднеквадратической погрешностью  $0,02 \text{ см}^3/\text{см}^3$  соответствуют средней влажности почвы в слое 0–1 см (рис. 7).

## Измерение полной влажности и температуры мёрзлой почвы на основе регистрации отношения линейно-поляризованных сигналов ГНСС

Рассмотрим возможности дистанционного зондирования полной влажности и температуры мёрзлой почвы на основе измерения в частотном диапазоне L1 (1,2 ГГц) поляризационного индекса сигналов ГНСС, отражённых от непокрытой растительностью почвы, в случае типичных профилей температуры деятельного слоя тундровой почвы (рис. 8). Для профилей температуры, изображённых на рис. 8, на основе диэлектрической модели (Mironov et al., 2015) и итерационного подхода (Brekhovskikh, 1960) был рассчитан поляризационный индекс PRI, при этом влажность почвы по глубине задавалась фиксированным значением.

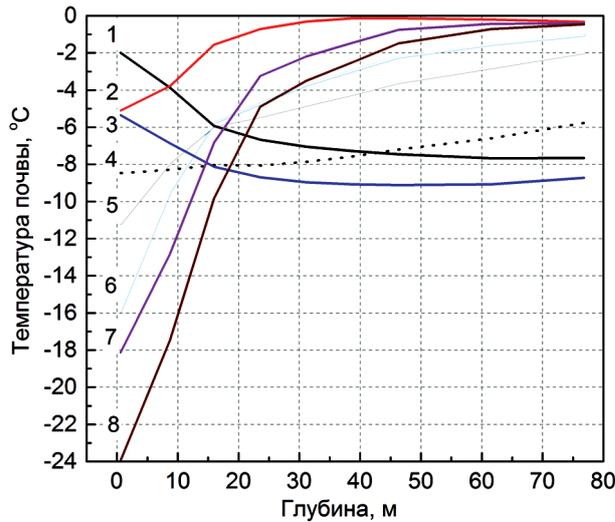


Рис. 8. Типичные профили температуры мёрзлого деятельного слоя почвы, измеренные в 2012 г. на метеостанции оз. Тулик, Аляска ([https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/home/?cid=NRCS142P2\\_053712](https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/home/?cid=NRCS142P2_053712))

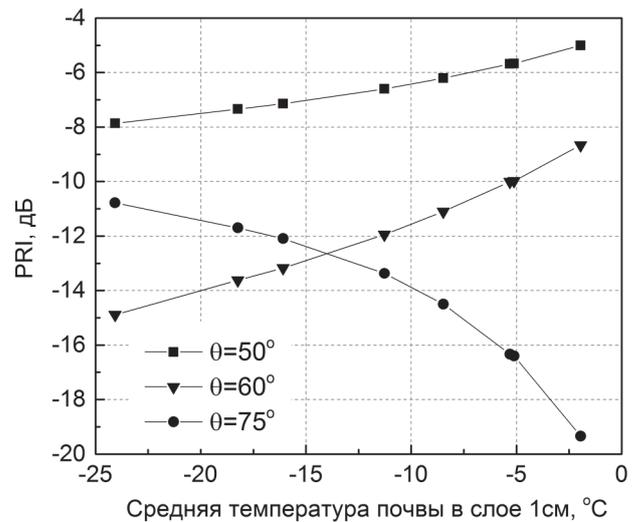


Рис. 9. Поляризационный индекс сигналов ГНСС в зависимости от средней температуры почвы в слое 0–1 см для трёх углов зондирования. Влажность и плотность почвы задавались равными 0,4 и 0,6 г/см<sup>3</sup> соответственно

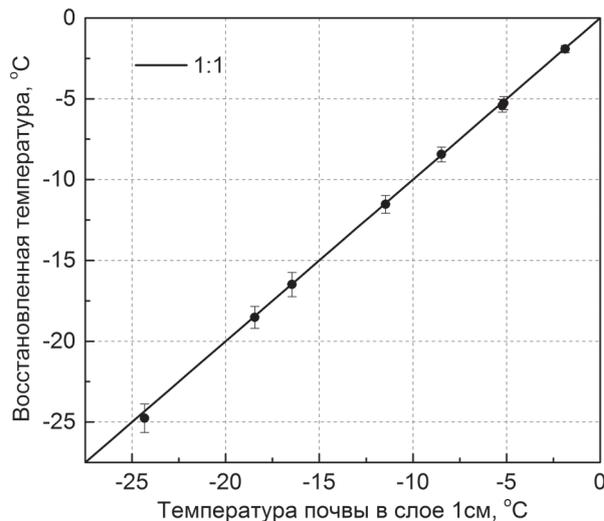


Рис. 10. Зависимость восстановленных значений температуры почвы в приближении однородного слоя от средних измеренных значений температуры слоисто-неоднородной почвы в слое 0–1 см

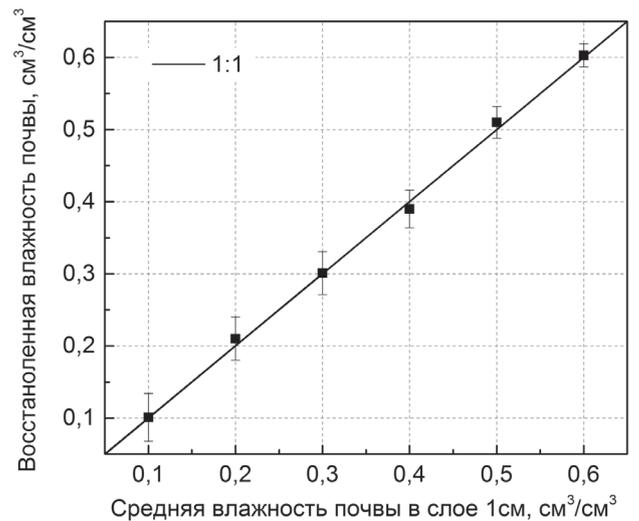


Рис. 11. Восстановленные значения полной влажности мёрзлой почвы в приближении однородного полупространства в зависимости от средней влажности неоднородной почвы в слое 0–1 см

Для различных углов зондирования поляризационный индекс в зависимости от средней температуры почвы в слое 0–1 см изображён на *рис. 9* (см. с. 161). При увеличении средней температуры в слое почвы 0–1 см от  $-25$  до  $\sim 0$  °С поляризационный индекс изменяется примерно на 7,4–8,5 дБ (вблизи угла Брюстера) и примерно на 3,5–5 дБ в диапазоне углов от 40 до 55° (*рис. 9*). Данные изменения индекса *PRI* существенно превышают уровень зашумлённости (1,5–2 дБ) измеряемых коэффициентов отражения из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС. Отметим, что в области температур от  $-10$  до 0 °С наблюдается наибольшая крутизна кривых (см. *рис. 9*). Физической причиной температурной зависимости коэффициентов отражения, а следовательно, и индекса *PRI* являются фазовые переходы преимущественно между рыхлосвязанной водой и почвенным льдом при изменении температуры почвы. В случае арктических тундровых почв с высокой влажностью (больше, чем максимальное количество связанной воды  $\sim 0,19$  г/г для почв с содержанием органического вещества более 80 %) наблюдается экспоненциальный рост количества рыхлосвязанной воды при увеличении температуры почвы от  $-25$  до 0 °С (Mironov et al., 2015). В связи с тем, что показатель преломления рыхлосвязанной воды всего лишь на 12 % меньше, чем у свободной воды, КДП почвы с ростом температуры от  $-25$  до  $-1$  °С увеличивается примерно в 1,5–2 раза (Mironov et al., 2015), что и приводит к температурным изменениям *PRI*. Наблюдаемая температурная зависимость (см. *рис. 9*) позволяет не только измерять температуру мёрзлой почвы, но также для различных температур мёрзлой почвы оценивать её полную влажность с использованием диэлектрической модели (Mironov et al., 2018). Исследуем возможность восстановления температуры и полной влажности слоисто-неоднородной мёрзлой тундровой почвы на основе измерения поляризационного индекса *PRI* из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС в приближении однородного диэлектрического полупространства. С этой целью решим обратные задачи минимизации нормы невязки между значениями *PRI*, рассчитанными (с добавлением случайной величины, распределённой по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением 1,5 дБ) для профилей температуры почвы, изображённых на *рис. 8*, и значениями *PRI*, рассчитанными для однородного полупространства. При восстановлении температуры полная влажность однородного полупространства почвы задавалась фиксированными значениями из диапазона от 0,1 до 0,6 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>. В случае восстановления полной влажности температура однородного полупространства почвы задавалась равной средней температуре в поверхностном слое 0–1 см. В результате оказалось, что восстановленные значения температуры мёрзлой почвы с коэффициентом корреляции 0,998 и со среднеквадратической погрешностью 0,5 °С соответствуют средней температуре почвы в слое 0–1 см (*рис. 10*, см. с. 161). В случае когда исходные значения влажности почвы при решении обратной задачи задавались со среднеквадратической погрешностью 0,05 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, это приводило к изменению на  $\pm 2$  °С погрешности восстанавливаемых значений температуры мёрзлой почвы. Восстановленные значения полной влажности мёрзлой почвы с коэффициентом корреляции 0,997 и в пределах среднеквадратической погрешности 0,03 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> совпали с полной влажностью мёрзлой почвы в среднем в слое 0–1 см (*рис. 11*, см. с. 161). При этом погрешность определения полной влажности мёрзлой почвы изменяется в среднем на  $\pm 0,01$  см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>, если исходные значения температуры почвы при решении обратной задачи задаются со среднеквадратической погрешностью 5 °С.

## Заключение

Применяемая в данной работе модель слоисто-неоднородной диэлектрической среды с резкой границей раздела между воздухом и диэлектрическим полупространством почвенного покрова демонстрирует недостаточную чувствительность поляризационного индекса, рассчитанного в случае вертикальной и горизонтальной поляризации на частотах 1,2 и 1,6 ГГц на фоне практически наблюдаемых шумов интерференционной картины 1,5–2 дБ, для дистанционного зондирования профилей влажности талой сельскохозяйственной и температуры мёрзлой тундровой почвы. Тем не менее результаты моделирования показывают, что

диапазон вариаций индекса *PR1* потенциально позволяет восстанавливать профиль влажности и температуры, если приём сигналов ГНСС будет обеспечен с уровнем шума менее 1 дБ (например, оптимизацией времени интегрирования при корреляционной обработке сигнала приёмником либо различными процедурами усреднения сигнала по азимуту, по общему количеству спутников и числу проходов спутниками зондируемого участка). Использование стандартных приёмников сигналов ГНСС с указанным уровнем шума, а также неприменение процедуры усреднения позволяет восстановить среднюю влажность и температуру почвы в поверхностной слое толщиной ~1 см. Предложенный в данной работе подход восстановления влажности и температуры почвы на основе измерения отношения линейно-поляризационных коэффициентов отражения из интерференционных диаграмм сигналов ГНСС, обладая пониженной чувствительностью к влиянию шероховатости поверхности почвенного покрова, биомассы растительности, неточности определения высоты положения фазового центра антенны над рельефом местности, обеспечивает пригодные для практического применения точности измерения влажности и температуры почвы менее 0,03 см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup> и 1 °С соответственно. В будущем авторы планируют провести тестирование предложенного метода в ходе долговременных полевых измерений на сельскохозяйственных полях в районе г. Красноярска и в естественных тундровых условиях в районе г. Норильска.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-05-00405, 0356-2018-0060), а также Программы П.12.1. «базовых» фундаментальных исследований СО РАН.

## Литература

1. *Arroyo A. A.* Contributions to Land, Sea, and Sea-Ice Remote Sensing Using GNSS-Reflectometry: PhD thesis. Universitat Politecnica de Catalunya, 2016. 424 p.
2. *Arroyo A. A., Camps A., Aguasca A., Forte G., Monerris A., Rüdiger 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 Lett.* 2014. V. 11. No. 12. P. 2090–2094.
3. *Beckman P., Spizzichino A.* The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Elmsford, N. Y.: Pergamon, 1963. 503 p.
4. *Brekhovskikh L. M.* Waves in Layered Media. N. Y.: Academic Press, 1960. 561 p.
5. *Carreno-Luengo H., Amèzaga A., Vidal D., Olivé R., Munoz J. F., Camps A.* First Polarimetric GNSS-R Measurements from a Stratospheric Flight over Boreal Forests // *Remote Sensing.* 2015. V. 7(10). P. 13120–13138.
6. *Ceraldi E., Franceschetti G., Iodice A., Riccio D.* Estimating the soil dielectric constant via scattering measurements along the specular direction // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 2005. V. 43. No. 2. P. 295–305.
7. *Egido A., Paloscia S., Motte E., Guerriero L., Pierdicca N., Caparrini M., Santi E., Fontanelli G., Floury N.* Airborne GNSS-R Polarimetric Measurements for Soil Moisture and Above-Ground Biomass Estimation // *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.* 2014. V. 7. No. 5. P. 1522–1532.
8. GLONASS interface control document. Navigational radiosignal. In bands L1, L2. (Edition 5.1). M., 2008. 63 p.
9. *Larson K. M.* GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water.* 2016. V. 3. P. 775–787.
10. *McCreight J. L., Small E. E., Larson K. M.* Snow depth, density, and SWE estimates derived from GPS reflection data: Validation in the western U. S. // *Water Resources Research.* 2014. V. 50. P. 6892–6909.
11. *Mironov V. L., Muzalevskiy K. V.* The new algorithm for retrieval of soil moisture and surface roughness from GNSS reflectometry // *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS).* Munich, 2012. P. 7530–7532.
12. *Mironov V. L., Kosolapova L. G., Fomin S. V.* Physically and mineralogically based spectroscopic dielectric model for moist soils // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 2009. V. 47. No. 7. P. 2059–2070.

13. Mironov V.L., Kerr Y.H., Kosolapova L.G., Savin I.V., Muzalevskiy K.V. A Temperature-Dependent Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 1.4 GHz // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2015. V. 8. No. 9. P. 4470–4477.
14. Njoku E.G., Kong J.-A. Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture // J. Geophysical Research. 1977. V. 82. No. 20. P. 3108–3118.
15. Watanabe M., Kadosaki G., Kim Y., Ishikawa M., Kushida K., Sawada Y., Tadono T., Fukuda M., Sato M. Analysis of the Sources of Variation in L-band Backscatter From Terrains With Permafrost // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2012. V. 50. No. 1. P. 44–54.
16. Zavorotny V.U., Voronovich A.G. Bistatic GPS signal reflections at various polarizations from rough land surface with moisture content // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 24–28 July 2000, USA, Honolulu. 2000. V. 7. P. 2852–2854.
17. 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. V. 2. No. 4. P. 8–45.
18. Zhang S., Roussel N., Boniface K., Cuong M., Frappart F., Darrozes J., Baup F., Calvet J.-C. Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop // Hydrology and Earth System Sciences. 2017. Vol. 21. P. 4767–4784.

## Measurement of soil moisture and temperature based on interference reception of linearly-polarized GLONASS and GPS signals

K. V. Muzalevskiy, M. I. Mikhailov

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

This paper presents the results of a theoretical study of the potential for remote sensing of moisture of agricultural thawed soil, moisture and temperature in tundra frozen soil based on measurement of the ratio between reflection coefficients on linear-orthogonal polarizations (polarization index) from the interference patterns of GLONASS and GPS signals recorded near the Earth's surface at frequencies of 1.2 and 1.6 GHz. The ranges of satellites elevation angles within which the coherent component exceeds the diffuse part in the mirror scattering of GLONASS and GPS signals by the surface roughness were estimated by Kirchhoff's method. In the course of solving the direct problem, the "measured" polarization index of reflected waves was simulated (with addition of a random variable distributed according to the normal law) at two frequencies of 1.2 and 1.6 GHz using typical moisture and temperatures profiles of soils. It is shown that the polarization index is not sensitive enough to retrieve the layered structure of moisture in thawed and temperature profile in frozen soil, against the background noise (1.5–2 dB) of the recorded interference diagrams. The inverse problem of soil moisture and soil temperature retrieval from the "measured" polarization index was solved in the approximation of dielectrically-homogeneous half-space. It is shown that for all the profiles examined, regardless of frequency of GNSS signals, the maximum error in soil moisture and soil temperature retrieval does not exceed  $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  and  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , relative to the corresponding average values calculated for the topsoil of 1 cm.

**Keywords:** Global navigation satellite systems, GLONASS, GPS, reflectometry, soil moisture, soil temperature, agricultural soils, Arctic tundra soils

Accepted: 10.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-155-165

## References

1. Arroyo A. A., *Contributions to Land, Sea, and Sea-Ice Remote Sensing Using GNSS-Reflectometry*, PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2016, 424 p.
2. Arroyo A. A., Camps A., Aguasca A., Forte G., Monerris A., Rüdiger 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 Geosci. Remote Sens. Lett.*, 2014, Vol. 11, No. 12, pp. 2090–2094.
3. Beckman P., Spizzichino A., *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Elmsford, New York: Pergamon, 1963, 503 p.
4. Brekhovskikh L. M., *Waves in Layered Media*, New York: Academic Press, 1960, 561 p.
5. Carreno-Luengo H., Amèzaga A., Vidal D., Olivé R., Muñoz J. F., Camps A., First Polarimetric GNSS-R Measurements from a Stratospheric Flight over Boreal Forests, *Remote Sens.*, 2015, Vol. 7(10), pp. 13120–13138.
6. Ceraldi E., Franceschetti G., Iodice A., Riccio D., Estimating the soil dielectric constant via scattering measurements along the specular direction, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, Vol. 43, No. 2, pp. 295–305.
7. Egido A., Paloscia S., Motte E., Guerriero L., Pierdicca N., Caparrini M., Santi E., Fontanelli G., Floury N., Airborne GNSS-R Polarimetric Measurements for Soil Moisture and Above-Ground Biomass Estimation, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, Vol. 7, No. 5, pp. 1522–1532.
8. *GLONASS interface control document. Navigational radiosignal. In bands L1, L2. (Edition 5.1)*, Moscow, 2008, 63 p.
9. Larson K. M., GPS interferometric reflectometry: applications to surface soil moisture, snow depth, and vegetation water content in the western United States, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2016, Vol. 3, pp. 775–787.
10. McCreight J. L., Small E. E., Larson K. M., Snow depth, density, and SWE estimates derived from GPS reflection data: Validation in the western U. S., *Water Resour. Res.*, 2014, Vol. 50, pp. 6892–6909.
11. Mironov V. L., Muzalevskiy K. V., The new algorithm for retrieval of soil moisture and surface roughness from GNSS reflectometry, *Proc. IGARSS*, Munich, 2012, pp. 7530–7532.
12. 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.
13. Mironov V. L., Kerr Y. H., Kosolapova L. G., Savin I. V., Muzalevskiy K. V., A Temperature-Dependent Dielectric Model for Thawed and Frozen Organic Soil at 1.4 GHz, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, Vol. 8, No. 9, pp. 4470–4477.
14. Njoku E. G., Kong J.-A., Theory for passive microwave remote sensing of near-surface soil moisture, *J. Geoph. Res.*, 1977, Vol. 82, No. 20, pp. 3108–3118.
15. Watanabe M., Kadosaki G., Kim Y., Ishikawa M., Kushida K., Sawada Y., Tadono T., Fukuda M., Sato M., Analysis of the Sources of Variation in L-band Backscatter From Terrains With Permafrost, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, Vol. 50, No. 1, pp. 44–54.
16. Zavorotny V. U., Voronovich A. G., Bistatic GPS signal reflections at various polarizations from rough land surface with moisture content, *Proc. IGARSS*, Honolulu, 2000, pp. 2852–2854.
17. 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.
18. Zhang S., Roussel N., Boniface K., Cuong M., Frappart F., Darrozes J., Baup F., Calvet J.-C., Use of reflected GNSS SNR data to retrieve either soil moisture or vegetation height from a wheat crop, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017, Vol. 21, pp. 4767–4784.