

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.8>
УДК 621.369.9

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ЗАСЕЯННОЙ ПШЕНИЦЕЙ ПОЧВЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАДИОИМПУЛЬСА НА ЧАСТОТЕ 630 МГц

К. В. Музалевский

Институт физики им. Л.В.Киренского – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО
РАН, 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, д.50, стр.38

Статья поступила в редакцию 30 ноября 2020 г.

Аннотация. В данной статье приведены результаты измерения влажности поверхностного слоя почвы толщиной 6см с использованием радиоимпульса на центральной частоте 693 МГц, излученного и принятого логопериодической антенной, ориентированной максимум диаграммы направленности в надир. Полевые эксперименты по измерению коэффициента отражения на центральной частоте радиоимпульса проводились с 25 мая по 8 июля 2020 на сельскохозяйственном поле, засеянном пшеницей, в районе с. Минуно (56.08676 С.Ш., 92.67944 В.Д.), Красноярский край. В ходе экспериментов высота пшеницы составляла от ~10см до ~60см. Радиоимпульсы формировались и регистрировались с использованием векторного анализатора цепей Agilent N9918A FieldFox, подключенного к выходу антенны. Методика оценки коэффициента отражения состояла в измерении максимума огибающей радиоимпульса, отраженного от почвенного покрова относительно максимума огибающей радиоимпульса, отраженного от металлического экрана, размещенного на поверхности почвы. Экспериментально установлено, что пренебрежение влиянием растительного покрова пшеницы высотой до 60см приводит к занижению дистанционно измеряемых значений влажности почвы на $0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Показано, что простая модель, описывающая затухание радиоимпульса в растительном покрове по экспоненциальному закону, с коэффициентом детерминации 0,976 и среднеквадратическим отклонением $0,03 \text{ см}^3/\text{см}^3$, позволяет дистанционно измерить влажность почвы в поверхностном слое 0-6см в ходе различных стадий вегетации пшеницы

высотой не более 60см. Автор видит неоспоримое преимущество использования сверхширокополосных импульсных сигналов, спектр которых сосредоточен в мегагерцовом диапазоне частот, для дальнейшего развития технологии дистанционного измерения влажности почв.

Ключевые слова: Радиолокация, радиоимпульсы, влажность почвы, растительность.

Abstract. This article presents the results of measuring the moisture content of 6 cm topsoil using a radio impulse with a central frequency of 693 MHz, emitted and received by a log-periodic antenna the radiation pattern of which is oriented on the nadir. Measurements of the reflection coefficient at the center frequency of the radio impulse were carried out from May 25 to July 8, 2020 in an agricultural field sown with wheat in the area of Minino village (56.08676 North Sh., 92.67944 East D.), Krasnoyarsk region. In the course of the experiments, the height of the wheat was from ~ 10cm to ~ 60cm. Radio impulses were formed and recorded using an Agilent N9918A FieldFox vector network analyzer connected to the antenna output. The method for estimating the reflection coefficient consisted in measuring the maximum of the envelope of the radio impulse reflected from the soil cover relative to the maximum of the envelope of the radio impulse reflected from the metal sheet placed on the soil cover. It has been experimentally established that neglecting the influence of wheat vegetation up to 60 cm in height leads to an underestimation of the retrieved soil moisture by $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. It is shown that a simple model describing the attenuation of a radio impulse in the vegetation cover according to an exponential law, with a determination coefficient of 0.976 and a standard deviation of $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, makes it possible to retrieved soil moisture in the surface layer of 0-6 cm thick at various stages of wheat growing no more than 60 cm high. The author sees the indisputable advantage of using ultra-wideband pulsed signals, the spectrum of which is concentrated in the megahertz frequency range, for the further development of technology for remote measurement of moisture in the arable layer of agricultural soils.

Key words: radiolocation, radio impulse, soil moisture, vegetation.

Введение

Ранее в работах [1-4] исследовались возможности дистанционного зондирования профилей влажности в пахотном слое почвы, непокрытой растительным покровом, на основе поляриметрических измерений в Р- и С-диапазонах частот коэффициентов отражения электромагнитных волн и сечений обратного радарного рассеяния. Вместе с тем, в работах [5, 6] показано, что пренебрежение влиянием растительного покрова в S- и С-диапазонах частот приводит к росту погрешности измерения объемной влажности почвы до $0,1 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Применение широкополосных импульсов Р-диапазона частот позволяет уменьшить рассеяние на элементах растительного покрова [7-9] и оценить влажность поверхности почвы с меньшей погрешностью $\sim 0,05-0,08 \text{ см}^3/\text{см}^3$. Однако экспериментальные исследования [10] показывают, что в Р-диапазоне частот в общей мощности волны, рассеянной слоистой структурой растительно-почвенного покрова, доля объемного рассеяния (затухания) волны на элементах растительного покрова травянистых пастбищ и сельскохозяйственных посевов (34-38%) сопоставима с долей рассеяния волны границей растительность-почва (43-56%). Этот факт подтверждает необходимость использования в алгоритмах рефлектометрических измерений влажности почвы адекватных моделей распространения волн в растительном покрове. Для описания распространения электромагнитных волн в растительных покровах преимущественно используются детерминистические модели, описывающие рассеяние волн на элементах растительности в виде отдельных случайно ориентированных диэлектрических фигур (цилиндры, диски, сферы) или в виде моделей растительного слоя с усредненными параметрами: высоты слоя, диэлектрической проницаемости, коэффициента экстинкции. Самолётные эксперименты с использованием радара Р-диапазона (Airborne Microwave Observatory of Sub-canopy and Subsurface, AirMOSS) показали [11, 12], что применение как детерминистической модели, так и модели в виде слоя с усредненными параметрами в алгоритмах дистанционного измерения влажности почвы, покрытой всевозможными видами растительного

покрова (пастбища, леса, и др.), позволяют измерить влажность почвы с погрешностью в диапазоне от 0,06 до 0,11 см³/см³. Вместе с тем, в литературе всё ещё мало изучены возможности дистанционного зондирования влажности сельскохозяйственных почв, покрытых растительным покровом злаковых культур, с использованием радиоимпульсов в Р-диапазоне частот. В данной работе представлены результаты экспериментального исследования дистанционного зондирования влажности почвы, засеянной пшеницей, с использованием радиоимпульса длительностью 4,7 нс на центральной частоте 693 МГц.

1. Организация полевых измерений

В качестве тестового полигона был выбран участок сельскохозяйственного поля, засеянного пшеницей, в районе пос. Монино (56.08676 С.Ш., 92.67944 В.Д.). Содержание глинистой фракции в поверхностном слое почвы варьировалось от 23 до 36%. Измерение влажности почвы в ходе созревания растительного покрова проводилось в поверхностном слое толщиной 6 см датчиком GS3 (регистрирующее устройство EM50) компании Decagon (США). Заводская калибровка для минеральных почв обеспечивала погрешность измерения объемной влажности в пределах 0,04 см³/см³. Высота и содержание влаги в растительном покрове измерялось рулеткой и термостатно-весовым методом, соответственно. Измерение коэффициента отражения производилось в надир импульсным методом на частоте 693 МГц с использованием широкополосной логопериодической РСВ-LP антенны (420МГц-1000МГц, $S_{11} < 10$ дБ, производства Kent Electronics (США)), закрепленной на высоте 95см над поверхностью почвы (см. рис. 1). Радиоимпульсные сигналы синтезировались с использованием подхода, изложенного в работе [4], на основе измерения в спектральной области коэффициента отражения S_{11} векторным анализатором цепей Agilent N9918A FieldFox вывод, которого подключался ко входу приёмно-передающей антенны. В соответствии с методикой, изложенной в работе [4], измерялись максимумы амплитуд огибающих радиоимпульсов, отраженных от почвы в ходе вегетационного

цикла пшеницы, и от металлического экрана, что позволило оценить модуль коэффициент отражения волны на центральной частоте радиоимпульса около 693 МГц. Калибровочные измерения максимумов амплитуд огибающих радиоимпульсов, отраженных от металлического экрана при различных высотах подвеса антенны, производились заблаговременно в ходе отдельного эксперимента см. рис. 2. Измеренные значения влажности почвы, влажности растительного покрова, коэффициентов отражения приведены в таблице 1.

Таблица 1. Значения коэффициентов отражения, влажности почвы, содержания воды и высоты растительного покрова в ходе проведения экспериментов

Дата	Объемная влажность почвы, $\text{см}^3/\text{см}^3$	Высота пшеницы ¹ , см	Содержание воды $\text{см}^3/\text{см}^3 \cdot 10^{-3}$	Модуль амплитуды коэффициента отражения
25.05.20 (сух.)	0,11	10	0,04	0,29
25.05.20 (вл.)	0,38	10	0,04	0,66
29.05.20	0,32	13	0,10	0,64
08.06.20	0,38	20	0,24	0,63
13.06.20	0,26	24	0,39	0,52
23.06.20	0,39	44	0,57	0,58
08.07.20	0,23	60	0,73	0,37

¹Погрешность определения высоты пшеницы $\pm 1-2\text{см}$

В качестве примера на рис. 3 приведены радиоимпульсы и их огибающие, измеренные при отражении от почвенно-растительного покрова (высота пшеницы 44 см) и от металлического экрана. На рис. 4 приведен спектр радиоимпульса, отраженного от металлического экрана. Длительность зондирующего импульса (отраженного от металлического экрана) составляла 4,7 нс по уровню 0,1 от амплитуды (см. рис. 3), а ширина спектра 268 МГц (по уровню -6дБ, см. рис. 4).



Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки и способа крепления антенны в ходе измерения коэффициента отражения.



Рис. 2. Процесс калибровки приемно-передающей антенны.

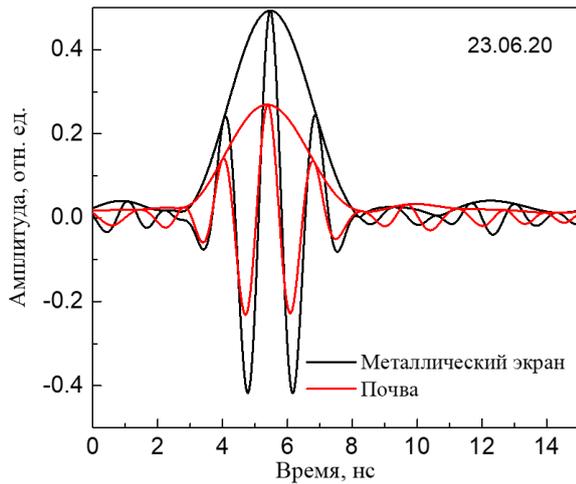


Рис. 3. Форма радиоимпульсов при отражении от металлического экрана и почвы.

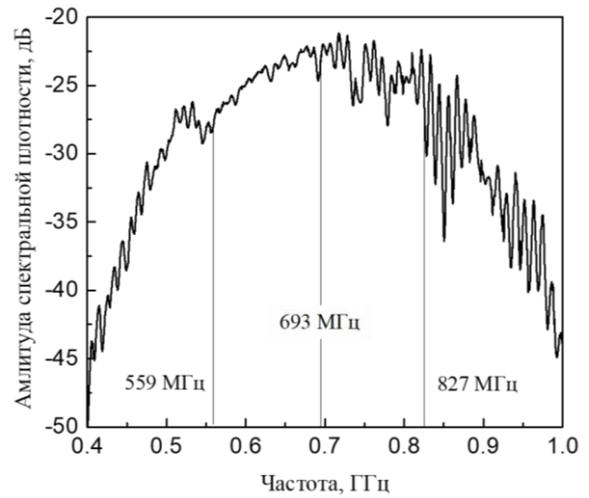


Рис. 4. Спектр зондирующего радиоимпульса, отраженного от металлического экрана.

2. Одночастотный метод измерения влажности почвы в Р-диапазоне частот

Влажность почвы будем находить в ходе решения обратной задачи минимизации нормы невязки между измеренным, R^m (см. табл. 1), и рассчитанным в приближении однородного диэлектрического полупространства, R_{bare}^{th} , модулями коэффициентов отражения. Для расчета коэффициента отражения R_{bare}^m будут использоваться стандартная формула Френеля и диэлектрическая модель [13], в которой содержание глинистой фракции задавалось равным $C=36\%$. Для минимизации нормы невязки использовался алгоритм Левенберга — Марквардта [14]. На рис. 5 приведены восстановленные значения влажности почвы из измеренных величин коэффициентов отражения (см. табл. 1) при сопоставлении с влажностью поверхности почвы, измеренной контактным методом на тестовом участке в поверхностном слое 6 см. Восстановленные значения влажности почвы систематически занижены на $0,05 \text{ см}^3/\text{см}^3$ относительно данных контактных измерений (см. рис. 5). При этом наблюдается высокое значение коэффициента детерминации $R^2=0,81$ между восстановленным и измеренными значениями влажности почвы.

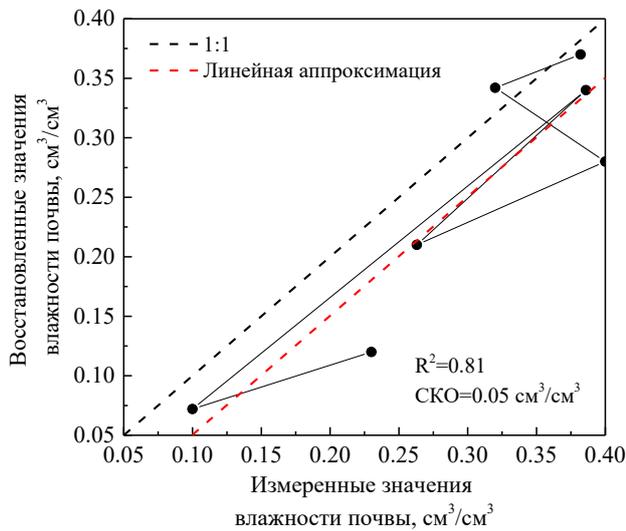


Рис. 5. Корреляция между восстановленными и измеренными контактными значениями влажности почвы.

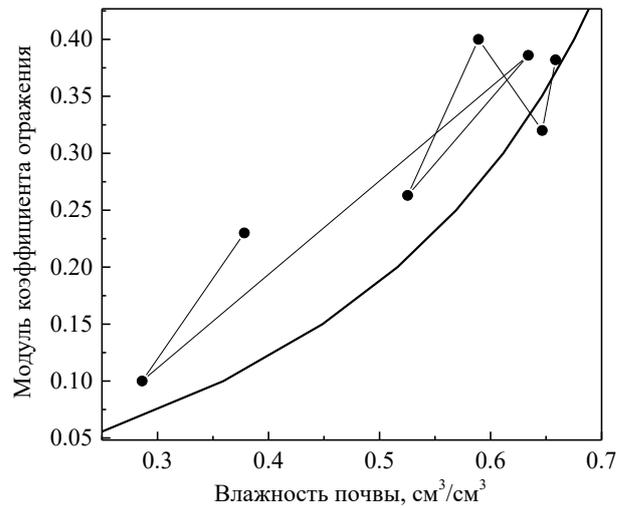


Рис. 6. Зависимость измеренного и рассчитанного значений модуля коэффициентов отражения.

Систематическое занижение восстановленных значений влажности почвы связано с согласующим влиянием растительного слоя, что приводит к занижению измеренного коэффициента отражения по отношению к рассчитанному (см. рис. 6) на основе данных контактных измерений влажности почвы (см. табл. 1). Оценим модуль коэффициента отражения, R_{veg}^{th} , на центральной частоте зондирующего импульса $f_0=693$ МГц с учётом растительного покрова, пренебрегая отражением волн от границы воздух-растительность, а также рассеянием волн мегагерцового диапазона на элементах растений, учитывая лишь затухание волны по экспоненциальному закону [15, 16]:

$$R_{veg}^{th} = R_{bare}^{th} \exp(-2k_0 a), \quad (1)$$

где $k_0=2\pi f_0/c$ - волновое число свободного пространства, c – скорость света в вакууме, a – константа, зависящая от содержания воды в растительном покрове, вида растений и толщины растительного слоя. Константу a в формуле (1) найдем из решения обратной задачи в ходе минимизации нормы невязки между измеренными, R^m (см. табл. 1), и рассчитанными по формуле (1)

коэффициентами отражения R_{veg}^{th} (с использованием измеренных значений влажности почвы из табл. 1). Найденные таким образом значения, a , в зависимости от высоты растительного покрова графически представлены на рис. 7. Исключая одну точку (см. рис. 7) при увеличении высоты растительного слоя от 10см до 60см вариации параметра a могут быть описаны экспоненциальным законом

$$a = 1,06 \cdot 10^{-3} \exp(h/22,53) \quad (2)$$

с коэффициентом детерминации $R^2=0,945$ и среднеквадратическим отклонением $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$. Установленная зависимость (2) позволяет оценить затухание волны в растительном слое пшеницы с использованием априорных данных о высоте растительного покрова и на основе формулы (1) скорректировать восстанавливаемые значения влажности почвы. Аналогично вышеописанному случаю восстановим влажность почвы (см. рис. 8) с использованием модели (1)-(2) и априорных данных о высоте растительного покрова из табл. 1. Учёт влияния растительного покрова с использованием простой модели (1)-(2) позволяет существенно улучшить прогноз влажности почвы (сравните рис. 5 и рис. 8) на основе дистанционных рефлектометрических измерений в Р-диапазоне на частоте 693МГц.

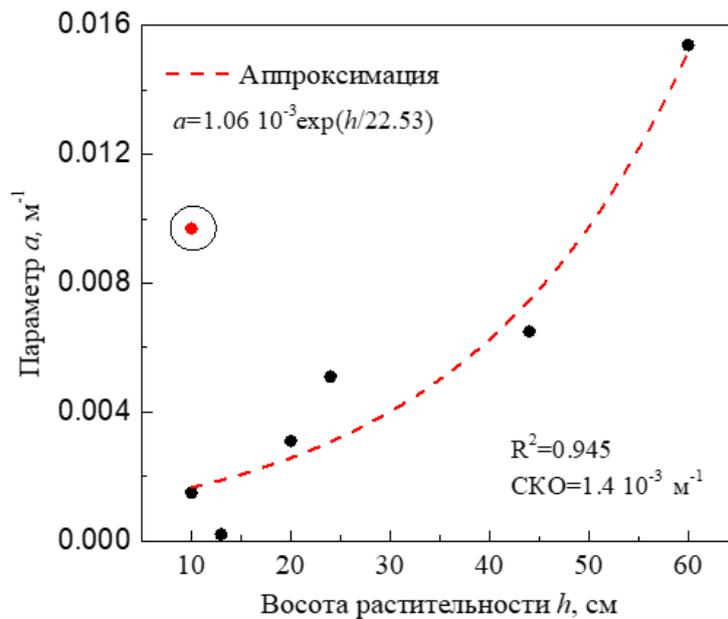


Рис. 7. Зависимость параметра a от высоты растительного покрова.

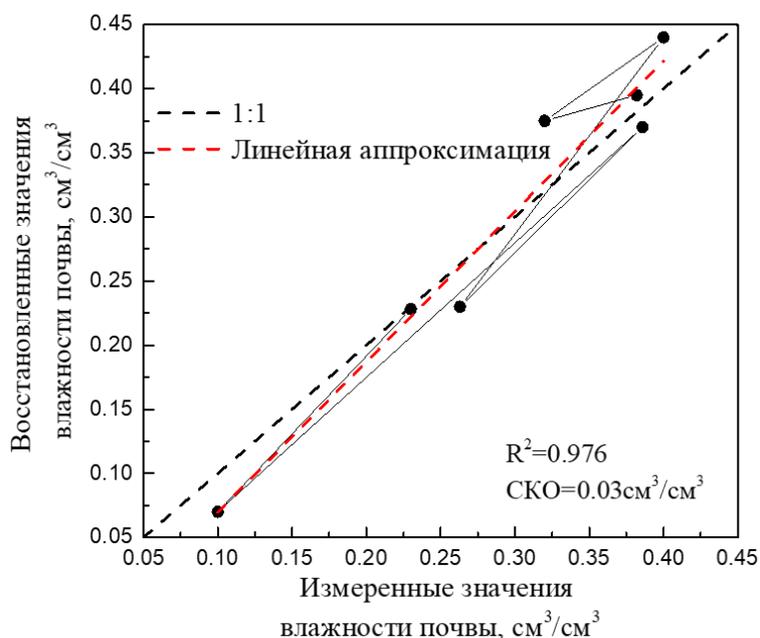


Рис. 8. Корреляция между восстановленными и измеренными значениями влажности почвы.

Заключение

В данной работе экспериментально продемонстрирована возможность дистанционного измерения влажности в поверхностном 6 см слое минеральной почвы на основе измерения в надир коэффициента отражения на частоте 693МГц. Экспериментально установлено, что пренебрежение влиянием растительного покрова пшеницы высотой до 60см приводит к занижению дистанционно измеренных значений влажности почвы на $0,05\text{ см}^3/\text{см}^3$. Показано, что простая модель, описывающая затухание радиоимпульса в растительном покрове по экспоненциальному закону, с коэффициентом детерминации 0,976 и среднее квадратическим отклонением $0,03\text{ см}^3/\text{см}^3$ позволяет дистанционно измерить влажность почвы, значение которой согласуется с объемной влажностью почвы, измеренной контактным методом в слое 0-6см.

Автор видит неоспоримое преимущество использования сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов, спектр которых сосредоточен в мегагерцовом диапазоне частот, для дальнейшего развития

технологии дистанционного измерения влажности почв. Использование СШП электромагнитных импульсов с непрерывным спектром в мегагерцовом диапазоне частот позволит исследовать фазо-частотные и амплитудно-частотные характеристики растительного покрова в сверхширокой полосе частот и установить закономерности связей между коэффициентом экстинкции, набегом фазы при прохождении волной растительного слоя с высотой растений и биомассой растительного слоя. Вместе с тем сверхширокая полоса СШП импульсов позволит решить многопараметрическую обратную задачу с использованием более сложных моделей профилей влажности почвы (чем однородное полупространство).

Благодарности

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ №18-05-00405, методика формирования радиоимпульсов и измерения коэффициентов отражения была развита при поддержке проекта Госзадания №0356-2019-0004.

Литература

1. Muzalevskiy K. Retrieving soil moisture profiles based on multifrequency polarimetric radar backscattering observations. Theoretical case study // International Journal of Remote Sensing. 2021. Vol.42. No.2. P.506-519.
2. Музалевский К.В. Дистанционное измерение профилей влажности в пахотном слое почвы на основе поляриметрических наблюдений коэффициента отражения в Р- и С-диапазонах частот. Эксперимент // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т.17. №3. С.145-148.
3. Музалевский К.В. Возможности дистанционного зондирования профилей влажности почв на основе поляриметрических наблюдений обратного рассеяния волн в Р- и С-диапазонах частот // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т.16. №5. С.203-216.

4. Музалевский К.В. Дистанционное измерение влажности в поверхностном слое минеральной почвы на двух частотах // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. No.1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.1.7>
5. Ardekani M.R. et al. A Layered Vegetation Model for GPR Full-Wave Inversion // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2016. Vol.9. No.1. P. 8-28.
6. Ardekani M. R., et al. GPR data inversion for vegetation layer // Proceedings of the 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, Brussels. 2014. P.170-175.
7. Serbin G., Or D. Near-Surface Soil Water Content Measurements Using Horn Antenna Radar: Methodology and Overview // Vadose Zone Journal. 2003. Vol.2. No.4. P.500-510.
8. Serbin G., D. Or D. Ground-penetrating radar measurement of soil water content dynamics using a suspended horn antenna // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2004. Vol.42. No.8. P.1695-1705.
9. Serbin G., Or D. Ground-penetrating radar measurement of crop and surface water content dynamics // Remote Sensing of Environment. 2005. Vol.96. No.1. P.119-134.
10. Alemohammad S.H., Konings A.G., Jagdhuber T., Moghaddam M., Entekhabi D. Characterization of vegetation and soil scattering mechanisms across different biomes using P-band SAR polarimetry // Remote Sensing of Environment. 2018. Vol.209. P 107-117.
11. Tabatabaenejad A. et al. P-Band Radar Retrieval of Subsurface Soil Moisture Profile as a Second-Order Polynomial: First AirMOSS Results // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol.53. No. 2. P.645-658.
12. Truong-Loi M., Saatchi S., Jaruwatanadilok S. Soil Moisture Estimation Under Tropical Forests Using UHF Radar Polarimetry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2015. Vol.53. No.4. P.1718-1727.

13. Миронов В.Л., Фомин С.В., Лукин Ю.И. Трех-релаксационная обобщенная рефракционная диэлектрическая модель влажных почв // Известия вузов. Физика. 2015. Т.58. №8/2. С.28-31.
14. Gill P.E., Murray W. Algorithms for Nonlinear Least-Squares Problem // SIAM Journal on Numerical Analysis. 1978. Vol.15. No.5. P.977-992.
15. Kirdiashev K.P., Chukhlantsev A.A., Shutko A.M. Microwave radiation of the Earth's surface in the presence of vegetation cover // Radio Eng. Electron. Phys. Engl. Transl. 1979. Vol.24. P.256-264.
16. Shutko A.M., Chukhlantsev A.A. Microwave radiation peculiarities of vegetative covers // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing. 1982. Vol.20. P.27-29.

Для цитирования:

Музалевский К.В. Измерение влажности засеянной пшеницей почвы с использованием радиоимпульса на частоте 630 МГц. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.12.8>