

DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.7

УДК 621.369.9

ДИСТАНЦИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МИНЕРАЛЬНОЙ ПОЧВЫ НА ДВУХ ЧАСТОТАХ

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 4 декабря 2019 г.

Аннотация. В данной работе экспериментально исследовалась возможность дистанционного зондирования влажности в поверхностном слое минеральной почвы на частоте 5,4ГГц (С-диапазон) и на частоте 0,63ГГц (Р-диапазон). Применялась бистатическая схема измерения коэффициента отражения в свободном пространстве на фиксированном угле зондирования 35° на горизонтальной и вертикальной поляризации. Вследствие широкой диаграммы направленности используемых антенн применялся радиоимпульсный метод для разделения во временной области прямого и отраженного от почвенного покрова сигналов. В качестве приемной и передающей антенн использовалась рупорная (5,4ГГц) и логопериодическая (0,63ГГц) антенны. Радиоимпульсы формировались с использованием векторного анализатора цепей Agilent N9918A FieldFox. Методика оценки коэффициента отражения состояла в измерении максимума огибающей радиоимпульса, отраженного от почвенного покрова относительно максимума огибающей радиоимпульса, отраженного от металлического экрана, размещенного на почвенном покрове.

Экспериментально установлено, что дистанционно измеренная объемная влажность почвы на частоте 5,4ГГц, в приближении однородного диэлектрического полупространства, с квадратом коэффициента корреляции 0,780-0,897 и среднеквадратическим отклонением 1,3-2,3% (в зависимости от используемой поляризации) согласуется с влажностью поверхности почвы, измеренной контактным методом в слое 0-0,5см. Использование частоты

5,4ГГц как основной для восстановления влажности поверхности почвы нуждается в дополнительной проверке в различных условиях шероховатости поверхности почвы и растительного покрова. Предложенная модель профиля влажности почвы в виде кусочно-линейной функции позволяет дистанционно рефлектометрическим методом на двух частотах измерять объемную влажность почвы в слое 10см с квадратом коэффициента корреляции 0,758 и среднеквадратическим отклонением 2,4% относительно влажности почвы, измеренной контактными методами.

Автор видит неоспоримое преимущество использования сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов, спектр которых сосредоточен в мегагерцовом диапазоне частот, для дальнейшего развития технологии дистанционного измерения профилей влажности в пахотном слое агропочв. Использование сверхширокополосных электромагнитных импульсов с непрерывным спектром в мегагерцовом диапазоне частот позволит решить многопараметрическую задачу по восстановлению профиля влажности в пахотном слое агропочв. В будущем технология СШП импульсного зондирования благодаря доступности миниатюрных электронных устройств может быть реализована для платформ сверхлёгкого беспилотного летательного аппарата с целью картирования влажности в пахотном слое агропочв.

Ключевые слова: радиолокация, влажность почвы.

Abstract. In this work, the possibility of remote sensing of moisture in the mineral topsoil at a frequency of 5.4 GHz (C-band) and at a frequency of 0.63 GHz (P-band) was experimentally investigated. Bistatic scheme for measuring of the reflection coefficient at a fixed angle of 25° on horizontal and vertical polarization was used. Due to the wide radiation pattern of the used antennas, the radio impulse method was used to separate in the time domain the direct and reflected signals from the soil cover. As the receiving and transmitting antennas the pair of horn (5.4 GHz) and pair log-periodic (0.63 GHz) antennas were used. Radio impulses were generated in an unreal time scale using an Agilent N9918A FieldFox vector network analyzer. The

technique for measuring the reflection coefficient consisted in the measurement of 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 screen placed on the soil cover. It is experimentally established that the soil moisture, which was remotely measured at a frequency of 5.4 GHz, in the approximation of a homogeneous dielectric half-space, with a correlation coefficient of 0.780-0.897 and a standard deviation of 1.3-2.3% (depending on wave polarization) is consistent with the soil surface moisture measured by the contact method in a layer of 0-0.5 cm. Using the frequency of 5.4 GHz as the main one for retrieving soil surface moisture needs additional verification in various conditions of roughness of the soil surface and vegetation cover. The proposed model of the soil moisture profile in the form of a piecewise-linear function allows remotely measuring on two-frequencies soil moisture in topsoil with a correlation coefficient of 0.758 and a standard deviation of 2.4% relative to the soil moisture measured by the contact method. The author sees the indisputable advantage of using ultra-wideband (UWB) pulsed signals, the spectrum of which is concentrated in the megahertz frequency range, for the further development of technology for remote measurement of moisture profiles in the arable layer of agricultural soils. The use of ultra-wideband electromagnetic pulses with a continuous spectrum in the megahertz frequency range will allow us to solve the multi-parameter problem of restoring the moisture profile in the arable layer of agricultural soils. In the future, the UWB technology of pulsed sounding due to the availability of miniature electronic devices can be implemented for platforms of an ultra-light unmanned aerial vehicle with the aim of mapping moisture in the arable layer of agricultural soils.

Key words: radiolocation, soil moisture.

1. Введение

Мониторинг пространственного распределения влажности почвенного покрова является одним из элементов системы точного земледелия. Локальные измерения влажности почвы, осуществляемые в настоящее время путем отбора

почвенных образцов (термостатно-весовой метод) или с использованием датчиков влажности почвы (методом рефлектометрических измерений во временной или частотной области, ёмкостным методом, нейтронным методом, и т.д.), содержат ограниченную информацию о небольшой доли общей площади [1] и затрудняют оценку пространственной неоднородности влажности почвы в пределах всего поля. Прямые измерения вертикального распределения влажности в пахотном слое почвы с использованием мультиспектральных наблюдений в инфракрасном и видимом диапазоне сдерживаются невозможностью проникновения волн этого спектра сквозь растительный покров и в глубь почвы. За последние 40 лет во многих исследованиях успешно демонстрируется использование микроволновых радарных и радиометрических методов дистанционного зондирования влажности почвы [2]-[5] в СВЧ диапазоне частот (более 1ГГц). Применение данного диапазона частот обеспечивает измерение влажности в поверхностном слое почвы $<5\text{см}$ [2] и принципиально не позволяет восстановить распределение влажности по всей глубине пахотного слоя (до $\sim 0,3\text{м}$). Использование дециметрового диапазона по отношению к СВЧ диапазону принципиально позволяет восстанавливать профиль влажности в пахотном слое почвы [6]-[9]. В работе [10] на основе многочастотного (140МГц, 430МГц, 1,3ГГц, 8,6ГГц) поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой “ИМАРК” производства ОАО «Концерн радиостроения «ВЕГА»» [11] экспериментально подтверждена принципиальная возможность оценки вертикального распределения влажности почвы сельскохозяйственных полей на глубину до 2,5м. С 2021-2022г на орбите будут функционировать два космических аппарата, обеспечивающих поляриметрическую радарную съемку поверхности Земли в глобальном масштабе на частоте 435МГц (BIOMAS) и на частоте 5,4ГГц (Sentinel-1), что открывает перспективы создания новых двухчастотных алгоритмов дистанционного измерения влажности почвы в корневой зоне на основе наблюдения обратного радарного рассеяния волн Р- и С- диапазона частот. Однако в литературе слабо изучены возможности

радарного измерения профилей влажности почвы с применением волн этих двух диапазонов частот. Основная цель данной работы состоит в экспериментальном подтверждении возможности дистанционного измерения профилей влажности агропочвы в пахотном слое с использованием радиоволн на двух частотах Р- и С- диапазона.

2. Организация полевых измерений

В качестве тестового полигона был выбран участок размером 3м × 3м сельскохозяйственного поля, находящегося под паром в районе пос. Монино (56.0865 С.Ш., 92.6791 В.Д.). Перед проведением измерений участок был подготовлен: перекопан поверхностный слой почвы 25-30см для придания ему более однородной структуры, поверхность почвы была разрыхлена и проборонована с целью уменьшения шероховатости поверхности почвы. Весовое содержание глинистой фракции в поверхностном слое почвы составляло 34% (анализ проведен ФГБУ ГЦАС «Красноярский»). Шероховатость поверхности почвы автоматически измерялась лазерной рулеткой UNI-T UT390b (погрешность по дальности 2мм), закрепленной на подвижной платформе (см. рис .1). Шаг платформы по горизонтальной оси в среднем составлял 2,5мм. На рис. 2 представлены результаты измерения высот неровностей поверхности почвы, выполненные в разное время вдоль (08.08.2019), поперек (29.07.2019) и наискось (05.08.19) тестового участка. (В связи с тем, что при каждом измерении высота установки горизонтальных направляющих была различной, из каждого измеренного профиля было вычтено значение минимальной высоты профиля). Для трёх профилей среднеквадратические отклонения (СКО) высот неровностей поверхности почвы, h_r , оказались в пределах 5,7-8,2мм. При этом в среднем наибольшие перепады тестового участка на расстоянии порядка 1,5м не превышают 2,5см, а в центральной части участка - менее 1,5см. В соответствии с данными, предоставленными на рис. 2, поверхность почвенного покрова можно считать гладкой в смысле критерия Рэлея $h_r < 1/8 \cos 25^\circ \approx 7,7$ мм, для наименьшей длины волны зондирования 5,6см (5,4ГГц), используемой в данной работе.



Рис. 1. Автоматическая платформа с направляющими в ходе измерения шероховатости поверхности почвы лазерной рулеткой.

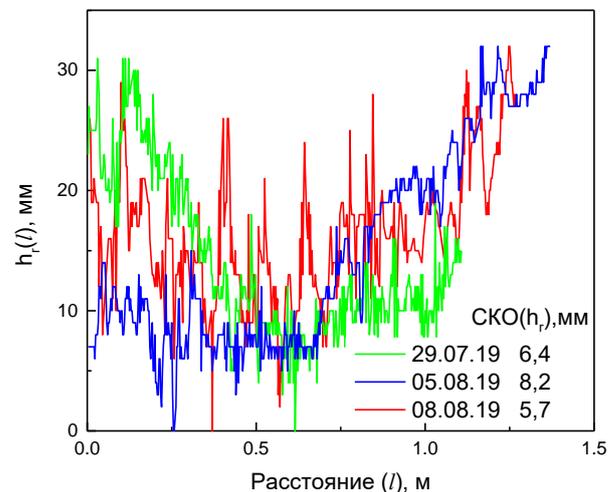


Рис. 2. Профили высот неровностей поверхности почвы, измеренные лазерной рулеткой, на тестовом участке.

Измерение вертикальных профилей объемной влажности в пахотном слое почвы проводилось датчиком GS3 (регистрирующее устройство EM50) компании Decagon (США). Заводская калибровка для минеральных почв обеспечивала погрешность измерения объемной влажности в пределах $0,04\text{см}^3/\text{см}^3$. Измерение профилей объемной влажности почвы осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе по всему тестовому участку примерно в 30-40 точках измерялась объемная влажность почвы на глубине 2,75см, при ориентации стержней датчика (длиной 5,5см) вертикально вниз. Далее с краю тестового участка с поверхности почвы снимался слой толщиной 1см и насыпался кучкой для измерения влажности поверхности почвы. На последнем этапе на площадке размером 30х30см последовательно убиралось несколько сантиметров почвы до глубины порядка 20см и проводились измерения в 30-10 точках при ориентации стержней датчика вертикально вниз (см. рис. 3). Измеренные таким образом значения объемной влажности почвы усреднялись, и рассчитывалось стандартное отклонение (доверительный интервал задавался равным 95%). На рис. 4 продемонстрированы два профиля влажности, измеренные 29 июля и 30 июля в разных местах тестового участка. Хорошее совпадение измеренных профилей влажности говорит о повторяемости

результатов и о надежности выбранной методики измерений (см. рис. 4).
 Профили влажности почвы, измеренные в другие дни проведения экспериментов, представлены на рис. 5.



Рис. 3. Ход измерения профилей объемной влажности почвы на тестовом участке.

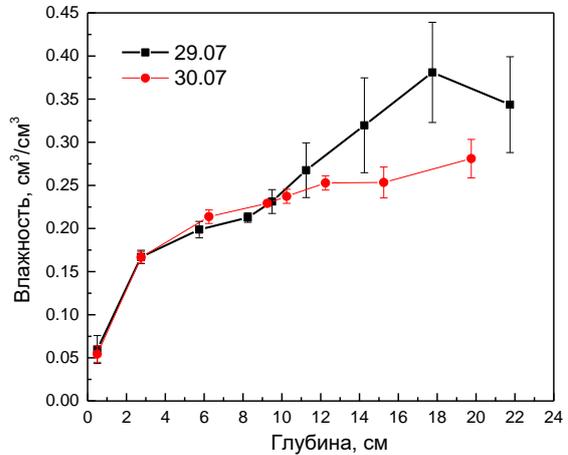


Рис. 4. Профили значений объемной влажности почвы, измеренные на тестовом участке 29 и 30 июля 2019г.

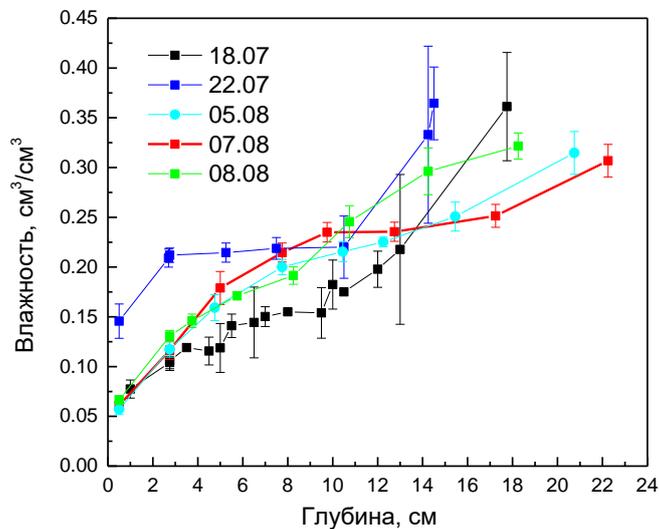


Рис. 5. Профили значений объемной влажности почвы, измеренные на тестовом участке с 18.07.19 по 08.08.19.

Измерение коэффициента отражения на горизонтальной и вертикальной поляризациях проводилось под углом 35° импульсным методом на частоте 5,4ГГц (С-диапазон) и 0,63 ГГц (Р-диапазон) с использованием широкополосных рупорной антенны П6-59 (1 ГГц-18 ГГц, $S_{11}<10\text{дБ}$)

производства ФГУП "СКБ РИАП" (Россия, г. Нижний Новгород) и логопериодической РСВ-LP антенны (420МГц-1000МГц, $S_{11} < 10\text{дБ}$) производства Kent Electronics (США). Угол зондирования, равный 35° , был выбран для максимального разделения во времени прямого (передающая антенна-приёмная антенна) и отраженного от поверхности почвы (передающая антенна-почва-приёмная антенна) сигналов в условиях ограниченной длины кабелей (антенны-генератор/приёмник), высоты крепления антенн (треноги) и размеров площадки зондирования. Конфигурация размещения антенн в ходе эксперимента продемонстрирована на рис. 6 и рис. 7. Радиоимпульсные сигналы синтезировались с использованием подходов [12]-[14], на основе измерения в спектральной области параметра прохождения S_{12} ($S_{12} \approx S_{21}$) векторным анализатором цепей Agilent N9918A FieldFox (диапазон частот до 18ГГц), к выводам которого подключались передающая и приёмная антенны. Длина кабеля от анализатора цепей до рупорной и логопериодической антенны составляла порядка 5м и 8м, соответственно.



Рис. 6. Геометрия размещения рупорных антенн и анализатора спектра Agilent N9918A FieldFox в ходе измерений.



Рис. 7. Геометрия размещения логопериодических антенн. (На фотографии показан также лист фольгированного утеплителя, который использовался для калибровки в методике измерения коэффициента отражения).

Каждый цикл дистанционных рефлектометрических и контактных измерений проводился примерно с 11.00 до 19.00ч (по местному времени) и занимал 5-6 часов с учётом установки и юстировки антенн в заданную конфигурацию зондирования (угол наблюдения 35°) с использованием уровня, отвеса и рулетки, а также их демонтажа, всякий раз в каждом новом цикле измерений. В первый день измерений 18.07.19 использовалась конфигурация №1, в последующие дни конфигурация №2 (см. таблицу 1).

Таблица 1. Расстояние между антеннами, l , и высота, h , размещения антенн над поверхностью почвы в ходе полевого эксперимента*

Конфигурация	Рупорная антенна		Логопериодическая антенна	
	h , см	l , см	h , см	l , см
1	178,0	249,0	151,0	211,5
2	163,0	228,0	147,5	206,5

* отсчет величин h и l производился от центральной точки прямоугольного раскрыва рупорной антенны, и от центра малого основания трапеции логопериодической антенны.

3. Методика формирования радиоимпульсов и измерения коэффициента отражения

Спектр амплитуды напряжения на выходе приёмной антенны $S_{12}(\omega)$, с учётом влияния почвенного покрова в приближении распространения плоской волны, может быть записан в виде

$$S_{12}(\omega) = S_0(\omega)F(\omega, \vartheta = |65^\circ|) + S_0(\omega)F(\omega, \vartheta = 0^\circ)R(\omega, \vartheta'), \quad (1)$$

где $S_0(\omega)$ – спектр амплитуды напряжения на входе передающей антенны, ω - круговая частота электромагнитной волны, $F(\omega, \vartheta)$ - спектр коэффициента передачи антенной системы в направлении ϑ , с учётом набега фазы при распространении плоской волны в свободном пространстве (полагаем, что

передающая и приёмная антенны обладают одинаковыми коэффициентами передачи, диаграммы направленности которых симметричны относительно направления $\vartheta = 0^\circ$). Направление $\vartheta = 0^\circ$ соответствует ориентации максимума диаграммы направленности антенны под углом $\vartheta' = 35^\circ$ по отношению к нормали, опущенной на поверхность почвы. $R(\omega, \vartheta')$ - коэффициент отражения Френеля. Для формирования узкополосных радиоимпульсов с заданной шириной спектра воспользуемся преобразованием Фурье и весовой спектральной функцией $P(\omega)$

$$P(\omega) = \frac{1}{s_1} \left(1 - \frac{1}{s_2} \right), \quad (2)$$

где $s_1 = 1 + \exp(-(\omega - \omega_0 + \omega_1/2)/\omega_2)$, $s_2 = 1 + \exp(-(\omega - \omega_0 - \omega_1/2)/\omega_3)$ ω_0 - центральная частота радиоимпульса, параметры $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ заданы ниже. В результате временная форма огибающей радиоимпульса на выходе приёмной антенны может быть записана в виде

$$S_{12}(t) = S_{12}^i(t) + S_{12,s}^r(t), \quad (3)$$

$$S_{12,s}^r(t) = |R(\omega_0, \vartheta')| \cdot \frac{2}{\pi} \left| \int_0^\infty d\omega e^{-i\omega t} P(\omega) S_0(\omega) F(\omega, \vartheta = 0^\circ) \right|,$$

где $S_{12}^i(t)$ и $S_{12}^r(t)$ - огибающие прямого и отраженного от почвы радиоимпульса, соответственно, t - время. В выражении (3) модуль коэффициента отражения $|R(\omega_0, \vartheta')|$ вынесен за знак интеграла на центральной частоте ω_0 зондирующего радиоимпульса. В случае, если конфигурация приёмно-передающих антенн не меняется, аналогичное выражение может быть записано и для огибающей радиоимпульса, $S_{12,m}^r(t)$, отраженного от металлического листа, покрывающего почву, полагая $|R(\omega_0, \vartheta')| \approx 1$

$$S_{12,m}^r(t) = \frac{2}{\pi} \left| \int_0^\infty d\omega e^{-i\omega t} P(\omega) S_0(\omega) F(\omega, \vartheta = 0^\circ) \right|. \quad (4)$$

В этом случае два измерения максимумов амплитуды огибающей радиоимпульсов, отраженных от почвы и металлического экрана, позволяют

оценить модуль коэффициент отражения волны от почвенного покрова на центральной частоте ω_0

$$|R(\omega_0, \vartheta')| = \frac{\max[S_{12,s}^r(t)]}{\max[S_{12,m}^r(t)]}. \quad (5)$$

Для формирования радиоимпульса на частоте 5,4ГГц и 0,63ГГц с использованием рупорной и логопериодической антенны использовались следующие параметры (см. таблицу 2) весовой спектральной функцией $P(\omega)$. Подобные параметры весовой спектральной функции $P(\omega)$ позволили сформировать зондирующие радиоимпульсы на частоте 5,4ГГц и 0,63ГГц с шириной спектра $\sim 1,4$ ГГц и $\sim 0,3$ ГГц, соответственно, что обеспечило надёжное разделение во временной области прямого и отраженного от почвы радиоимпульса. Частотное сканирование анализатора цепей для рупорной и логопериодической антенны задавалось в диапазоне от 50МГц до 8ГГц и от 10МГц до 2ГГц, соответственно. Общее количество точек отсчётов по частоте задавалось равным 10001.

Таблица 2. Параметры весовой спектральной функции $P(\omega)^*$

	f_0 , ГГц	f_1 , ГГц	f_2 , ГГц	f_3 , ГГц
Рупорная антенна	5,4	0,6	0,35	0,35
Логопериодическая антенна	0,63	0,4	0,01	0,02

* $\omega=2\pi f$, f – частота электромагнитной волны.

Оценим размеры отражающего металлического экрана, который необходим для покрытия площади, занимаемой отраженным радиоимпульсом в плоскости почвенного покрова, в заданной конфигурации зондирования (см. Таб. 1). Рассмотрим диаграммы направленности каждой из антенн (см. рис. 8а и 8б). Для рупорной антенны максимальная полуширина диаграммы направленности равна $8,5^\circ$ (Е-плоскости поляризации) по уровню -3дБ (см.

рис. 8а). При заданном угле зондирования 35° эллиптическая площадка, обусловленная выделением участка поверхности почвенного покрова диаграммой направленности рупорной антенны, не превышает 0,85м вдоль большой оси эллипса. Логопериодическая антенна обладает существенно более широкой диаграммой направленности 122° по уровню -3дБ в Е-плоскости поляризации (см. рис. 8б), в результате «засвечивается» практически вся плоскость поверхности земли. Оценим размеры эллиптической площадки в плоскости поверхности почвенного покрова, определяемой первой зоной Френеля, которая является наиболее существенной при отражении волны. Для центральной частоты 0,63ГГц зондирующего радиоимпульса (в приближении квазимонохроматической волны), излучаемого логопериодической антенной, размеры большой a_1 и малой b_1 полуоси эллиптической площадки зондирования [15, см. стр. 84]:

$$a_1 = \frac{1}{\cos \vartheta} \frac{\sqrt{\lambda h^2}}{2h \cos \vartheta}, \quad b_1 = a_1 \cos \vartheta, \quad (6)$$

где $\lambda=0,48$ м длина волны, при высоте расположения антенны над поверхностью почвы равной $h=1,51$ м и угле зондирования 35° , оказались равны $a_1=0,81$ м и $b_1=0,66$ м. В результате проведенных расчётов для калибровки рефлектометрической установки достаточно выбрать квадратный экран со сторонами, равными примерно 2м. Экран выбранных размеров полностью вмещает в себе геометрию первой зоны Френеля (эллипс, размеры большой и малой оси которого равны соответственно 1,62м и 1,32м), размеры которой были оценены для центральной частоты 0,63ГГц радиоимпульса, излучаемого логопериодической антенной.

Перед проведением измерений, векторный анализатор цепей выдерживался включенным около 30 минут, затем производилась его калибровка с использованием стандартного механического калибратора (Full 2-port Calkit, 85518A, Type-N-50Ohm). Данная калибровка обеспечивает измерение амплитуды и фазы с погрешностью 0,35дБ и 1.9° , соответственно в диапазоне амплитуд сигналов -20 до 0дБ на частотах <9 ГГц [18].

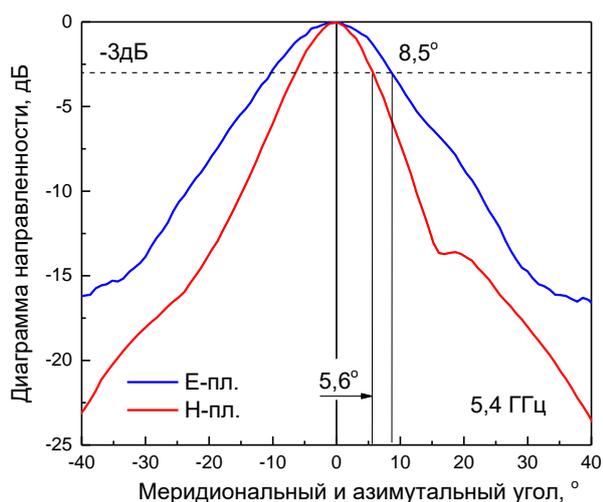


Рис. 8а. Нормированная диаграмма направленности рупорной антенны в Е- и Н- плоскостях поляризации [16].

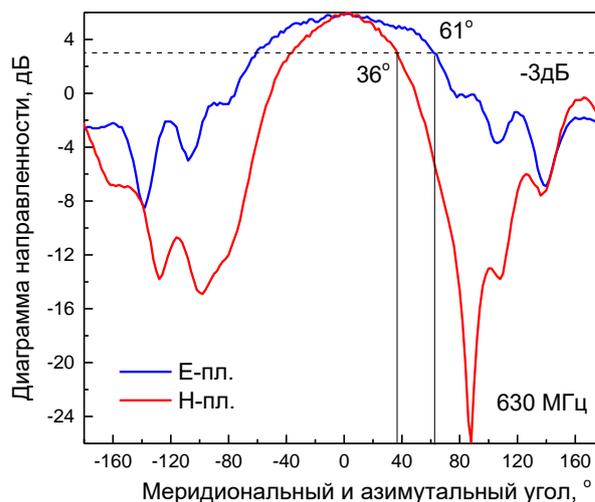


Рис. 8б. Диаграмма направленности логопериодической антенны в Е- и Н- плоскостях поляризации [17].

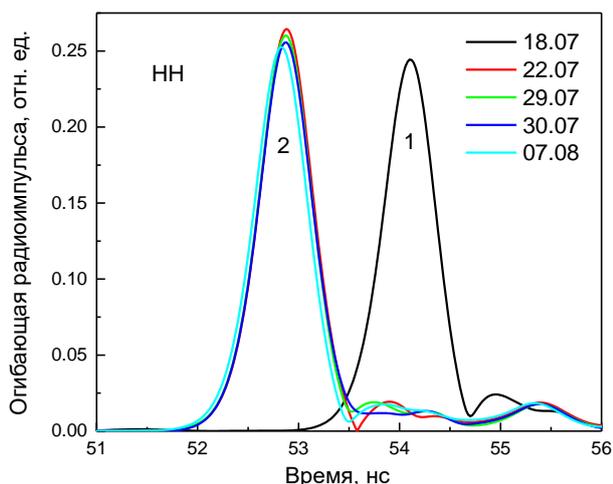


Рис. 9а. Огибающие радиоимпульсов, отраженных от почвенного покрова центральная частота радиоимпульсов 5,4ГГц.

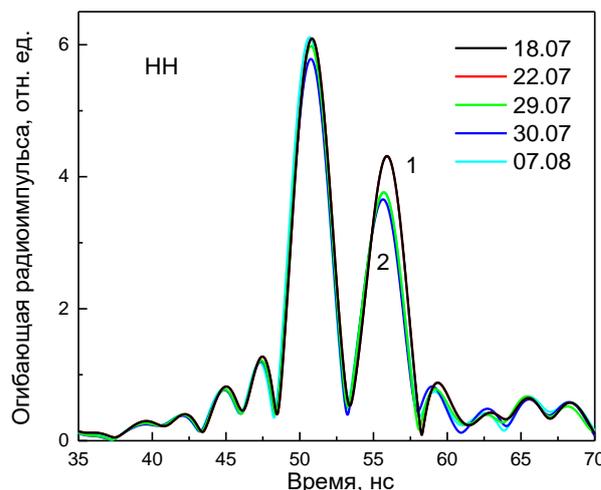


Рис. 9б. Огибающие прямого (~51нс) и отраженного (~56нс) от почвенного покрова радиоимпульсов центральная частота 0,63ГГц.

Цифрой 1 и 2 обозначен номер конфигурации (см. таблицу 1).

В качестве примера на рис. 9а и 9б изображены огибающие радиоимпульсов, измеренные на горизонтальной поляризации при покрытии тестового участка фольгированным утеплителем, который выступал в качестве металлического экрана. Цифрой 1 и 2 на рис. 9а и 9б отмечена

соответствующая конфигурация приёмо-передающих антенн (см. таблицу 1). В ходе эксперимента погрешность измерения максимума амплитуды огибающей радиоимпульсов за счет неточности юстировки антенн не превысила 5,4% (см. рис. 9а и 9б). С учетом того, что антенны собирались и разбирались на тестовом участке всякий раз при проведении каждого эксперимента, данную погрешность в измерении максимума амплитуды огибающей радиоимпульсов можно считать удовлетворительной.

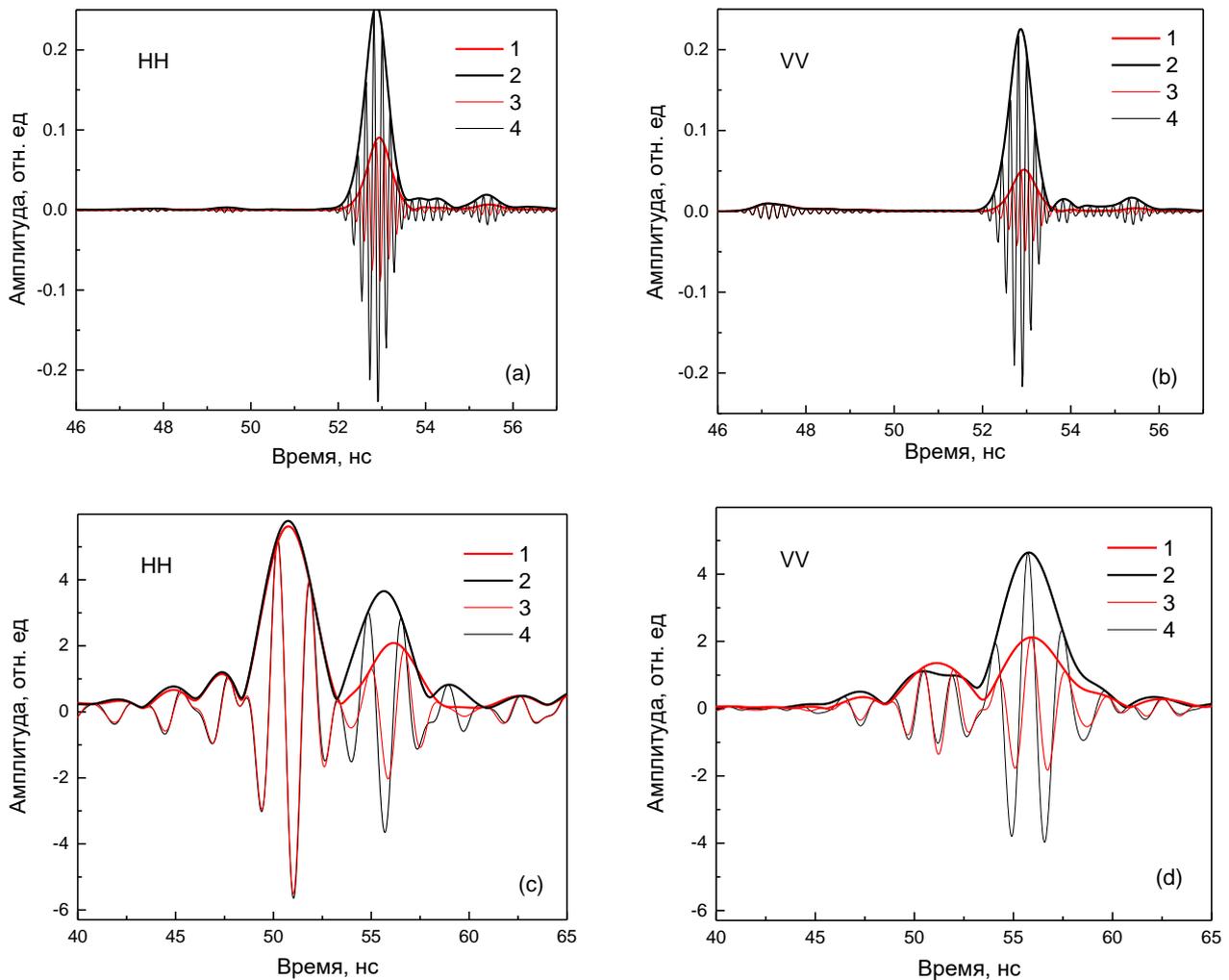


Рис. 10. Временные формы радиоимпульсов и их огибающие, измеренные на горизонтальной (НН) и вертикаальной (VV) поляризациях рупорной антенной на частоте 5,4ГГц (а), (б) и логопериодической антенной на частоте 0,63ГГц (с), (д). Чёрные и красные линии соответствуют измерению над металлическим экраном и почвенным покровом. Линии (1) и (2) относятся к огибающим радиоимпульсов, а линии (3) и (4) к временным формам радиоимпульсов.

В соответствии с вышеописанной методикой были сформированы радиоимпульсы и их огибающие в случае зондирования металлического экрана

и почвенного покрова для всех дней экспериментов с 18.07.19 по 08.08.19. В качестве примера на рис. 10 приведены радиоимпульсы и их огибающие, измеренные 30.07.19. В случае измерения рупорной антенной на частоте 5,4ГГц временные формы прямого импульса (антенна-антенна) и отраженного от подстилающей поверхности хорошо разделены по времени и амплитуде (см. рис. 10а и рис. 10b). Прямой и отраженный импульсы сосредоточены в районе 47нс и 53нс, соответственно. В случае измерения радиоимпульсов логопериодической антенной на частоте 0,63ГГц временные формы прямого и отраженного от подстилающей поверхности радиоимпульса также хорошо разделены по времени и амплитуде (см. рис. 10с и рис. 10d). Расстояние между прямым (~51нс) и отраженным (56нс) радиоимпульсом составляет 5нс, что на 2нс больше, чем длительность 3нс зондирующего радиоимпульса (см. рис. 10с и рис. 10d).

В соответствии с предложенной методикой были определены максимумы амплитуд огибающих радиоимпульсов, отраженных от металлического экрана и почвы, рассчитан коэффициент отражения по формуле (5). Результаты расчетов коэффициентов отражения за все дни экспериментов сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Значения коэффициентов отражения, измеренные рупорной (5,4ГГц) и логопериодической (0,63ГГц) антеннами на горизонтальной НН и вертикальной VV поляризациях.

Дата	0,63 ГГц		5,4 ГГц	
	НН	VV	НН	VV
18.07.2019	0,450	0,314	0,284	0,162
22.07.2019	0,635	0,517	0,577	0,385
29.07.2019	0,551	0,440	0,277	0,164
30.07.2019	0,536	0,438	0,355	0,249
05.08.2019	0,439	0,345	0,282	0,113
07.08.2019	0,413	0,306	0,375	0,172
08.08.2019	0,381	0,291	0,318	0,145

Значения коэффициентов отражения, измеренные на частоте 0,63ГГц больше, чем значения коэффициентов отражения, измеренные на частоте 5,4ГГц, что свидетельствует о большей влажности почвы низ лежащих слоев по отношению к её поверхности. Также наблюдается физически верная закономерность большей величины коэффициентов отражения измеренных на горизонтальной поляризации по отношению к вертикальной.

4. Метод измерения профилей влажности почвы на двух частотах

Покажем, что влажность почвы, восстановленная из измеренных коэффициентов отражения на частоте 5,4ГГц, совпадает с влажностью поверхности почвы, измеренной контактным методом. Влажность почвы будем находить в ходе решения обратной задачи по минимизации нормы невязки между измеренным, R^m , и рассчитанным в приближении однородного диэлектрического полупространства, R^c , коэффициентами отражения. Для расчета коэффициента отражения R^c использовались стандартные формулы Френеля [3], [4] и диэлектрическая модель [19], в которой содержание глинистой фракции задавалось равным $C=35\%$. Для минимизации нормы невязки использовался алгоритм Левенберга — Марквардта [20]. На рис. 11 приведены результаты восстановленных значений влажности почвы из измеренных величин коэффициента отражения на горизонтальной (HH) и вертикальной (VV) поляризации (см. таблица 3) при сопоставлении с влажностью поверхности почвы, измеренной контактным методом на тестовом участке (с учётом градиента влажности в поверхностном слое почвы толщиной 4см, см. рис. 4 и рис. 5).

Влажность почвы, восстановленная из коэффициента отражения измеренного на вертикальной поляризации, немного лучше согласуется с данными контактных измерений: квадрат коэффициента корреляции $R^2=0,897$ и среднеквадратическое отклонение СКО=1,3% по отношению ко влажности почвы, восстановленной из коэффициента отражения, измеренного на горизонтальной поляризации ($R^2=0,780$, СКО=2,3%).

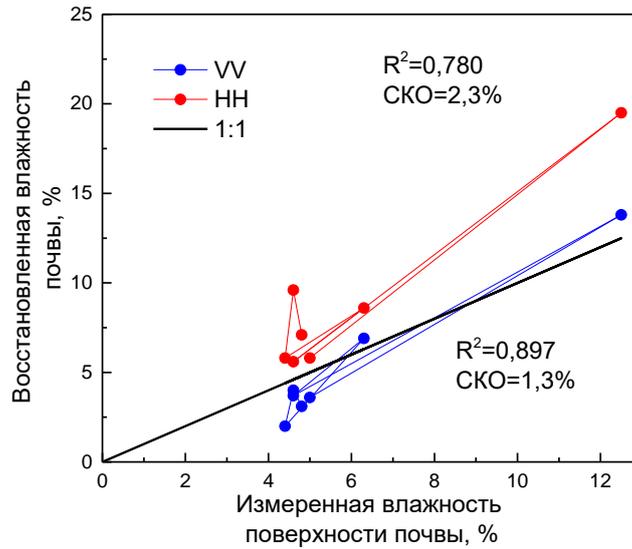


Рис. 11. Зависимость восстановленных и измеренных значений объёмной влажности поверхности почвы.

В силу ограниченности количества радарных наблюдений для описания экспериментальных профилей влажности (см. рис. 4 и рис. 5) будем использовать упрощенное решение уравнения вертикального влагопереноса в почве [7] в приближении кусочно-линейной функции

$$m(z) = \begin{cases} m_0 + (m_\infty - m_0)z / z_{eff}, & z \leq z_{eff}, \\ m_0 + (m_\infty - m_0), & z > z_{eff}, \end{cases}, \quad (7)$$

где m_0 - это влажность на поверхности почвы, m_∞ - это влажность на глубине z_{eff} , z это вертикальная координата. Влажность поверхности почвы m_0 будем определять (см. рис. 11) из измерений на частоте 5,4ГГц коэффициента отражения на вертикальной поляризации. Влажность почвы m_∞ и глубину z_{eff} будем находить методом прямого поиска минимального значения нормы невязки (расстояния) между информативными признаками: экспериментально измеренного на частоте 0,63ГГц, R_j^m , и рассчитанного, R_j^c , коэффициентов отражения

$$(m_\infty, z_{eff}) = \min \left\{ F = \sum_j \left| R_j^m - R_j^c(m_\infty, z_{eff}) \right|^2 \right\}, \quad (8)$$

здесь j пробегает все поляризации H и V . На рис. 12 изображен рельеф минимизируемого функционала F на сетке значений (m_∞, z_{eff}) на основе данных эксперимента от 05.08.19. Коэффициент отражения $R_j^c(m_\infty, z_{eff})$ рассчитывался с использованием диэлектрической модели [19], итерационным методом Бреховских [21] для плоскостройной среды, профиль влажности в которой задавался формулой (7). Как видно из рис. 12, для каждого значения влажности почвы $m_{\infty,p}$, начиная с какого-то значения (в данном случае около 9%), существует единственное значение $z_{eff,p}$, сводящее функционал F_p к единственному минимуму. В результате может быть найдено множество из N профилей влажности почвы (см. рис. 13), для которых пара значений $(m_{\infty,p}, z_{eff,p})$, $p=1, \dots, N$, сводит функционал F_p к минимуму. Для построения единственного решения предлагается провести усреднение по всему множеству найденных профилей с весом, пропорциональным величине минимума функционала F_p для каждого p -ого решения. Окончательно восстановленный профиль влажности почвы рассчитывался по формуле (7), в которой полагалось

$$m_\infty = \frac{\sum_{p=1}^N \min |F_p| m_{\infty,p}}{\sum_{p=1}^N \min |F_p|}, \quad z_{eff} = \frac{\sum_{p=1}^N \min |F_p| z_{eff,p}}{\sum_{p=1}^N \min |F_p|} \quad (9)$$

Как видно из рис. 13, большинство восстановленных профилей влажности почвы группируются в районе измеренного контактным методом профиля влажности почвы (в слое 0-7см). При этом для большинства восстановленных профилей влажности предложенные метод позволяет восстановить градиент влажности в слое толщиной $z_{eff,p}$ весьма близкий к измеренному контактным методом (см. рис. 13). Подобным образом были восстановлены профили влажности почвы для всех дней экспериментов. На рис. 14 приведены значения влажности почвы, восстановленные в слое 10см относительно данных контактных измерений.

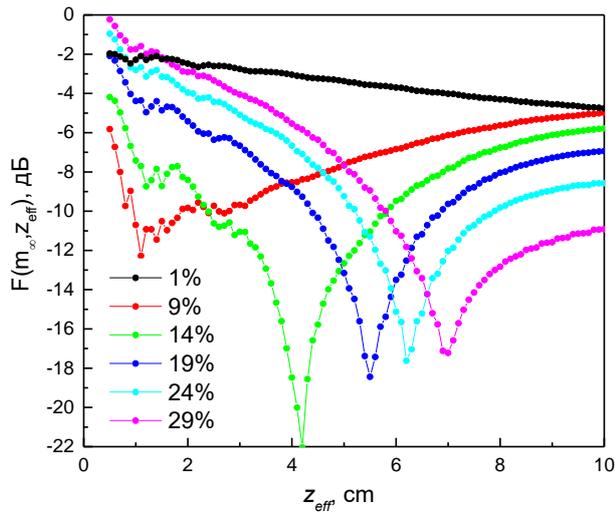


Рис. 12. Некоторые значения функционала F в зависимости от влажности почвы m_∞ (1%-29%) и величины z_{eff} .

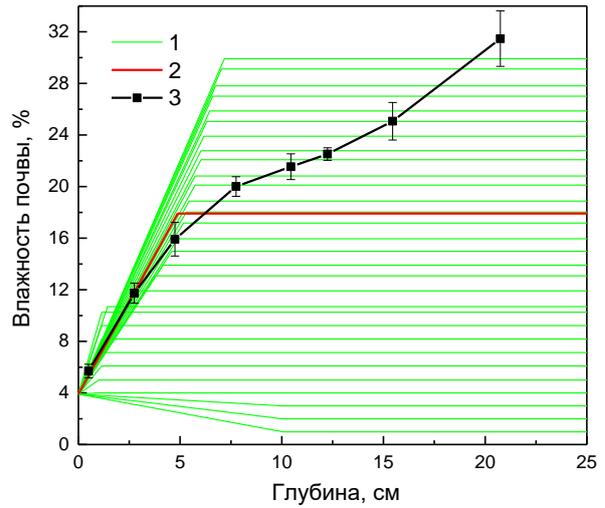


Рис. 13. Восстановленные (1) профили объемной влажности почвы для N пар значений $(m_{\infty,p}, z_{eff,p})$ сводящих функционал F_p к минимуму, 2-рассчитанный профиль влажности почвы на основе формул (7)-(9), 3-профиль влажности почвы, измеренный контактным способом 05.08.19.

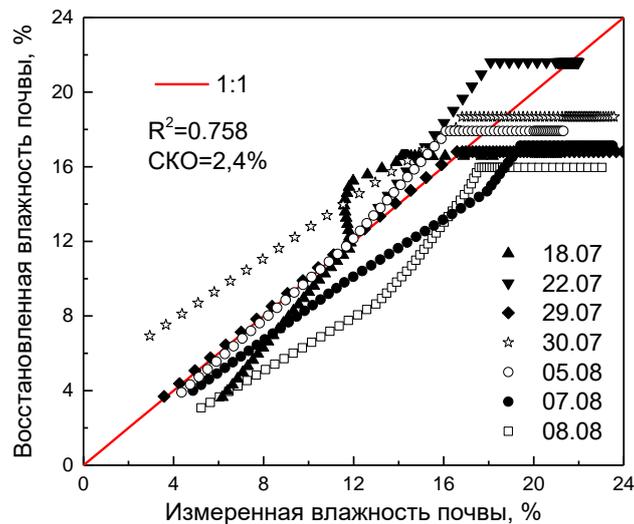


Рис. 14. Зависимость восстановленных и измеренных значений объемной влажности почвы в поверхностном слое 10см.

5. Заключение

В данной работе экспериментально продемонстрирована возможность дистанционного измерения профилей влажности в поверхностном слое минеральной почвы на основе измерения коэффициентов отражения на горизонтальной и вертикальной поляризациях на частотах 0,63 ГГц и 5,4 ГГц. Методика измерения коэффициентов отражения была основана на регистрации отраженных узкополосных радиоимпульсов от почвенного покрова с использованием рупорной и логопериодических антенн в схеме бистатического радарного зондирования под углом 35° . Экспериментально установлено, что дистанционно измеренная влажность почвы на частоте 5,4 ГГц, в приближении однородного диэлектрического полупространства, с квадратом коэффициента корреляции 0,780-0,897 и среднеквадратическим отклонением 1,3-2,3% (в зависимости от используемой поляризации) согласуется с объемной влажностью поверхности почвы, измеренной контактными методами в слое 0-0,5 см. Использование частоты 5,4 ГГц как основной для восстановления влажности поверхности почвы нуждается в дополнительной проверке в различных условиях шероховатости поверхности почвы и растительного покрова. Предложенная модель профиля влажности почвы в виде кусочно-линейной функции позволяет дистанционно рефлектометрическим методом измерять влажность почвы в слое 10 см с квадратом коэффициента корреляции 0,758 и среднеквадратическим отклонением 2,4% относительно влажности почвы, измеренной контактными методами.

Использование более широкого набора частот при измерении коэффициента отражения позволит существенно повысить точность измерения профилей влажности почвы, а также увеличить количество одновременно восстанавливаемых параметров задачи. В связи с этим, автор видит неоспоримое преимущество использования сверхширокополосных (СШП) импульсных сигналов, спектр которых сосредоточен в мегагерцовом диапазоне частот, для дальнейшего развития технологии дистанционного измерения профилей влажности в пахотном слое агропочв. Использование

сверхширокополосных электромагнитных импульсов с непрерывным спектром в мегагерцовом диапазоне частот позволит решить многопараметрическую задачу с использованием более сложных моделей профилей влажности почвы, уменьшить погрешность восстановления влажности почвы при использовании более простой кусочно-линейной модели. Кроме того, в отличие от бистатической схемы зондирования, используемой в данной работе, необходимо дополнительно исследовать возможности многочастотного зондирования профилей влажности в надир. (Моностатическая схема СШП импульсного зондирования в надир выглядит наиболее целесообразной при размещении приёмо-передатчиков на одном носителе. Моностатическая схема СШП импульсного зондирования при боковом обзоре в направлении обратного рассеяния волны также нуждается в дополнительном обосновании и исследовании). В будущем технология СШП импульсного зондирования благодаря доступности миниатюрных электронных устройств может быть реализована для платформ сверхлёгкого беспилотного летательного аппарата с целью картирования влажности в пахотном слое агропочв.

6. 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. Jonard F. et al. Observation and Measurement. Ecohydrology. Chapter 1. Ground-Based Soil Moisture Determination. Springer, Berlin. 2018. p.1-42.
2. Entekhabi D. et al. SMAP Handbook. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA. 2014. 182p.
3. Ulaby T. et al. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing, University of Michigan Press. 2013. 902p.

4. Шутко А.М. СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов. - М. : Наука, 1986. - 188с.
5. Schugge T., Remote Sensing of Surface Soil Moisture// Journal of Applied Meteorology. 1978. Vol.17. No 10. p.1549-1557.
6. Yueh S. H., Xu X., Shah R., Margulis S., Elder K. P-Band Signals of Opportunity for Remote Sensing of Root Zone Soil Moisture// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2018. pp. 1403-1406.
7. Sadeghi M., Tabatabaenejad A., Tuller M., Moghaddam M., Jones S.B. Advancing NASA's AirMOSS P-Band Radar Root Zone Soil Moisture Retrieval Algorithm via Incorporation of Richards' Equation// Remote Sensing. 2017. 9. 17.
8. 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. pp. 645-658.
9. Konings G., Entekhabi D., Moghaddam M., Saatchi S. S. The Effect of Variable Soil Moisture Profiles on P-Band Backscatter// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2014. Vol. 52. No. 10. pp. 6315-6325.
10. Поверхностное и подповерхностное зондирование покровов с помощью многочастотного поляриметрического радиолокатора с синтезированной апертурой [Текст]: отчет о НИР (закл.): №01201280948/ ФГБУН ИРЭ РАН; рук. Б. Г. Кутуза. Москва. 2015. 28 с.
11. Kутуза В., Davidkin A., Dzenkevich A., Kalinkevich A., Manakov V., Plushchev V., Shishkova O., Verba V., Vostrov E. Multi-frequency polarimetric synthetic aperture radar for surface and subsurface sensing// Proceedings of EuRAD, Horizon House Publications Ltd. 2004. P. 5-12.
12. Robinson L. A., Weir W. B., Young L. Location and recognition of discontinuities in dielectric media using synthetic RF pulses// Proceedings of the IEEE. 1974. Vol. 62. No. 1. pp. 36-44.
13. Robinson L. A., Weir W. B., Young L. An RF Time Domain Reflectometer Not in Real Time// IEEE GMTT International Microwave Symposium. 1972. pp. 30-32.

14. Iizuka K., Freundorfer A., Wilson D., Tsang G., Haras W., Measurement of saline ice thickness using a step frequency radar// *Cold Regions Science and Technology*. 1988. Vol. 15. No. 1. pp. 23-32.
15. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Советское радио, 1972, 464 с.
16. Антенна измерительная рупорная П6-59. Руководство по эксплуатации ИУШЯ.464653.005 РЭ. СКБ РИАП. 2017. 17с.
17. Antenna Test Lab. Example 2: Polar Plots Of PCB LPDA Antennas. 2017. Available at https://antennatestlab.com/wp-content/uploads/2017/02/WA5VJB_Mini-LPDA-2-11GHz_SUMMARY-Cuts.xlsx
18. FieldFox Handheld Analyzers. Data sheet. Keysight Technologies (2018) 66, 5990-9783EN. Документ доступен по ссылке: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-9783EN.pdf>
19. 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.
20. Gill P.E., Murray W. Algorithms for Nonlinear Least-Squares Problem, *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1978, Vol. 15, No. 5, pp. 977-992.
21. Brekhovskikh L.M. *Waves in Layered Media*, New York, NY, USA: Academic. 1960. P. 561.

Для цитирования:

Музалевский К.В. Дистанционное измерение влажности в поверхностном слое минеральной почвы на двух частотах. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2020. № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan20/7/text.pdf>. DOI 10.30898/1684-1719.2020.1.7