

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.7>

УДК: 537.87

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ АГРОПОЧВ ПОД ПОСЕВАМИ ЯЧМЕНЯ, ПШЕНИЦЫ И ОВСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С БОРТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

К.В. Музалевский

¹Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения РАН
660036, Красноярск, ул. Академгородок, 50 стр. 38

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2024 г.

Аннотация. В ходе долговременных экспериментов продемонстрирована возможность дистанционного зондирования электромагнитными импульсами, с борта беспилотного летательного аппарата (БПЛА), влажности агропочв сельскохозяйственных полей с посевами ячменя, овса и пшеницы в условиях естественного увлажнения, высыхания и периодического боронования. Тестовые поля располагались на территории ОПХ «Минино» (район с. Минино, Красноярский край). Зондирующие импульсы синтезировались на основе спектральных измерений (векторный анализатор цепей Caban R60) коэффициента отражения от входных зажимов логопериодической приемо-передающей антенны. Влажность почвы находилась в ходе решения обратной задачи минимизации нормы невязки между модулями коэффициента отражения, которые были рассчитаны по формуле Френеля (в приближении диэлектрически-однородного полупространства) и измерены в МГц диапазоне частот при различной высоте зависания БПЛА над тестовыми полями. Обсуждены преимущества и недостатки предложенного метода, а также перспективы развития технологии дистанционного зондирования влажности почв с БПЛА мультироторного типа.

Ключевые слова: БПЛА, радиолокация, сверхширокополосные импульсы, влажность почв.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках работ по гранту регионального конкурса РНФ и Красноярского краевого фонда науки № 22-17-20042.

Автор для переписки: Музалевский Константин Викторович, rsdkm@ksc.krasn.ru

Введение

В ближайшем будущем подавляющее большинство технологических циклов полевых сельскохозяйственных работ будут выполняться без участия человека с использованием сельхозмашин и авиаплатформ в рамках системы точного земледелия [1-3]. Влажность открытой почвы, почвы покрытой растительностью, высота и биомасса растений являются одними из важнейших биофизических параметров, мониторинг которых необходим в рамках системы точного земледелия. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), оборудованных сенсорами высокого пространственного разрешения, по-видимому, является наиболее перспективной и экономически обоснованной технологией высокодетального мониторинга этих биофизических параметров на большой площади в роботизированных комплексах точного земледелия [2,3]. Влажность открытых участков почвы, а также высота растительности относительно подстилающей поверхности могут быть измерены в оптическом диапазоне с использованием различной комбинации каналов мультиспектральных изображений [4-6] и лидаров [7,8], соответственно. Однако в случае плотной растительности радиоволновые методы являются, по-видимому, безальтернативными для дистанционного зондирования влажности подстилающих почвенных покровов [9-14] и высоты растительности [15-20].

В ходе наземных экспериментов по дистанционному зондированию, с использованием сверхширокополосных импульсов (СШП) субГГц-диапазона частот (длительность ~ 2 нс, средняя частота ~ 1 ГГц) была достигнута среднеквадратическая погрешность 8-12% (с максимальным систематическим

смещением -20%) измерения влажности почвы, покрытой растительным покровом (кукуруза, пшеница), относительно данных контактных измерений на глубине 2 см методом временной рефлектометрии [16,17]. В данном подходе влажность почвы восстанавливалась на основе измерения времени распространения импульса, отраженного от подповерхностного отражателя, либо на основе измерения модуля коэффициента отражения от границы воздух-почва (рассчитан по максимуму амплитуды импульса). Погрешность восстановления влажности почвы может быть снижена до 3% [17], при описании затухания зондирующего импульса в растительном покрове на основе закона Бугера (с использованием входного параметра площадь листовой поверхности посевов) и диэлектрической модели растительного покрова представленного в виде однородного слоя смеси воздуха и несолёной воды. В аналогичном подходе [21] эмпирическая калибровка показателя преломления и нормированного коэффициента затухания растительного покрова (чайная плантация высота растений 60-90 см), рассматриваемого также в виде диэлектрически-однородного слоя, позволила сократить погрешность восстановления объёмной влажности почвы с $\sim 4.5\%$ до 1.3% (использовалась диэлектрическая модель Топпа [22]). Данные оценки получены для зондирующего импульса с шириной спектра от ~ 500 МГц до 3 ГГц.

Проведенные исследования показывают, что с одной стороны применение СШП импульсов МГц-диапазона частот является наиболее предпочтительным для зондирования влажности почвы при минимизации явления рассеяния зондирующих импульсов на случайных неровностях поверхности почв и элементах растительного покрова [23]. С другой стороны информацию о биометрических характеристиках растительного покрова несут в себе рассеянные на элементах растительного покрова импульсы ГГц-диапазона частот. При этом как показано в работе [19,20] одновременная оценка нескольких факторов, влияющих на изменение амплитуды зондирующего импульса, за счет рассеяния на элементах растительного покрова, неровностях поверхности почвы, вариации

влажности почвы в общем случае не может быть осуществлена с использованием СШП георадарных импульсов субГГц-диапазона частот.

В данной работе исследуются возможности дистанционного зондирования влажности почвы сельскохозяйственных полей (ОПХ «Минино» ФИЦ КНЦ СО РАН, район пос. Минино, Красноярский край), засеянных ячменем, овсом и пшеницей с борта БПЛА с использованием электромагнитных импульсов, синтезированных на основе спектральных измерений векторного анализатора цепей Caban R60. В отличие от работ [24-28], в которых использовались либо специализированно изготовленные СШП приемо-передающие дипольные [24,25,28], рупорные антенны Вивальди [26], промышленно выпускаемые подповерхностные радары [17,28], в данной работе использовались две приемо-передающие логопериодические антенны (ЛПА) на диэлектрической подложке МГц и ГГц диапазона частот, амплитудно-частотные характеристики, которых корректировались методом инверсной фильтрации [29-31]. Влажность почвы восстанавливалась как из среднего значения модуля коэффициента отражения, измеренного в МГц диапазоне частот при различных высотах зависания БПЛА над поверхностью почвы, так и на основе однократных измерений при фиксированной высоте полета БПЛА с целью оценки влияния диффузного рассеяния волн на элементах растительного покрова и неровностях поверхности почвы на погрешность восстановленных значений влажности почвы. В ГГц диапазоне частот исследуется возможность регистрации с борта БПЛА зондирующего импульса рассеянного элементами растительного покрова.

1. Тестовые участки, дистанционные и наземные измерения

На территории ОПХ «Минино» ФИЦ КНЦ СО РАН в районе пос. Минино, Емельяновского района, Красноярского края было выбрано четыре тестовых поля засеянных ячменем, овсом и пшеницей (два поля), на которых в течении 2023-2024 гг. проводились дистанционные рефлектометрические измерения влажности почвы, покрытой и не покрытой растительным покровом. Схема

местоположений тестовых полей приведена на рис. 1 (поля имели размер примерно $100 \text{ м} \times 50 \text{ м}$).

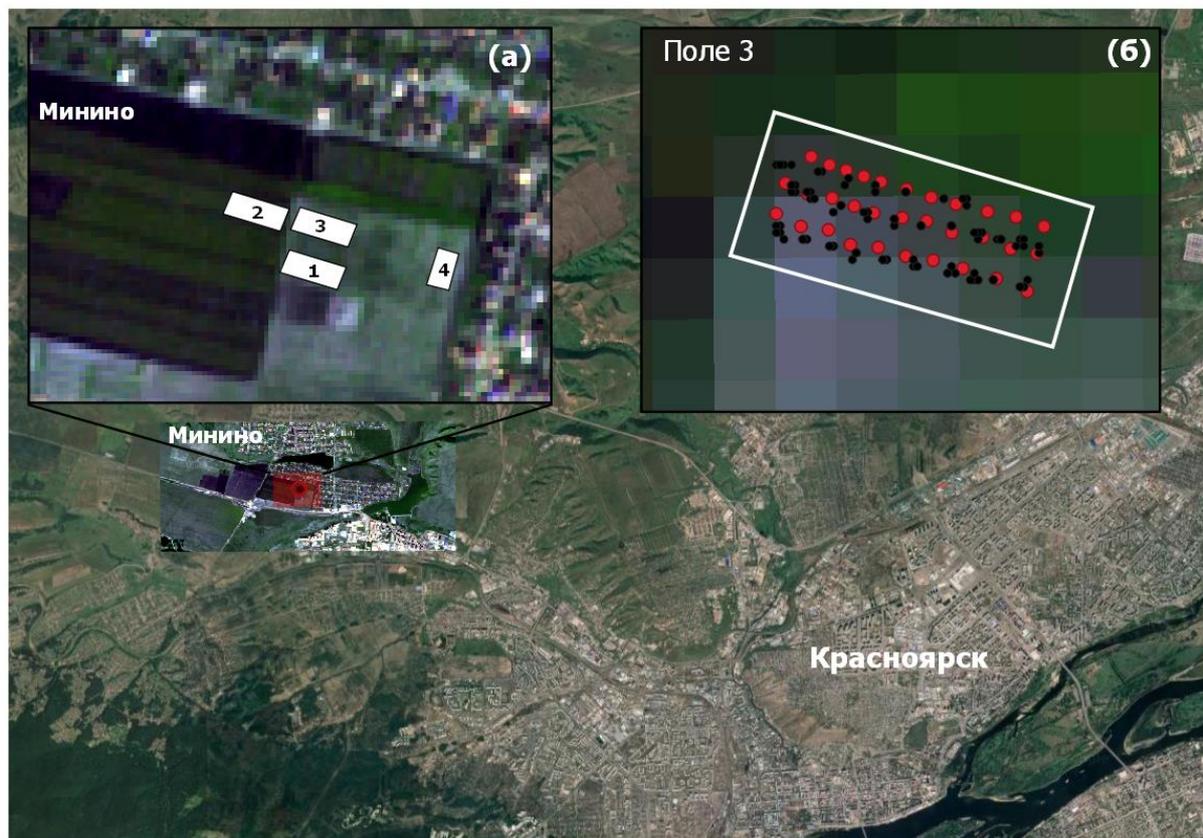


Рис. 1. Местоположение тестовых полей в районе пос. Минино (а), детальный вид (б) пространственных измерений влажности почвы (черные точки) и положение зависания БПЛА (красные точки) в ходе измерений 12.07.2024 г. на поле 3.

В ходе вегетационного цикла посевов, на полях измерялись следующие параметры: среднеквадратические отклонения (СКО) высот неровностей поверхности почвы, высота, вес свежих и сухих растений. СКО высот неровностей поверхности почвы измерялись лазерной рулеткой UNIT-T UT390b+, закрепленной на горизонтальном уровне на высоте примерно 25 см от поверхности почвы (измерения производились вдоль и поперек рядов посевов раздвигая растения в стороны и прижимая их к земле). Измерения влажности проводились датчиком EC-5 Decagon (использовалась заводская калибровка для минеральных почв) с использованием самодельного регистрирующего устройства, снабженного приемником Ublox NEO-6M сигналов ГЛОНАСС и GPS. Стержнями датчика почва прокалывалась вертикально вниз до глубины ~ 5.5 см,

что эквивалентно измерению влажности почвы в поверхностном слое толщиной 6-7 см. Так же на каждом из тестовых полей в одной точке измерялась влажность почвы в поверхностной части слоя 6-7 см и по вертикальному профилю на глубине 3 см, 6 см, 9 см и 15 см термостатно-весовым методом. Дистанционные рефлектометрические измерения БПЛА проводились как при зависании БПЛА над одной точкой поля на различных высотах, так и в пространственно-распределенных точках на тестовых полях на фиксированной высоте (см. рис. 1б).

2. Методика дистанционных рефлектометрических измерений с БПЛА

На БПЛА (квадрокоптер рама Tarot 650) был установлен рефлектометр, собранный с использованием векторного анализатора цепей (ВАЦ) SABAN R60 и логопериодической антенны (ЛПА) на диэлектрической подложке. В ходе измерений использовалось два варианта ЛПА с шириной полосы пропускания (по уровню -10 дБ) от ~ 400 МГц до ~ 1 ГГц [29-31,32] и от 870 МГц до 5.9 ГГц (см. рис. 3 ниже). В ходе зондирований на БПЛА могла быть закреплена только одна антенна. ЛПА закреплялась так, что максимум диаграммы направленности был ориентирован в надир. SMA разъем ЛПА соединялся коаксиальным кабелем длиной 50 см с ВАЦ SABAN R60. БПЛА управлялся полетным контроллером Pixhawk 4 и микрокомпьютером LattePanda V1. Разработанное программное обеспечение (на основе Python и библиотеки MAVSDK), управляло и синхронизировало движение БПЛА и рефлектометрические измерения ВАЦ SABAN R60. Управление ВАЦ SABAN R60 осуществлялось программно с использованием стандартных текстовых команд программируемых инструментов (SCPI) по протоколу TCP/IP. Симулятор jMAVSim использовался для верификации алгоритмов работы всего комплекса в ходе выполнения полетных заданий. Внешний вид БПЛА рефлектометра приведен на рис. 2.



Рис. 2. БПЛА в ходе измерений 12.07.2024 на поле №3.

В работах [29-31] была предложена методика, позволяющая в присутствии конструкции БПЛА, сформировать ЛПА СШП импульсы наносекундной длительности и провести абсолютную калибровку их амплитуды. Суть методики состоит в представлении антенно-фидерный тракт БПЛА-рефлектометра, размещенного в воздушной среде над отражающим полупространством, в виде четырехполюсника, спектральные элементы S -матрицы которого могут быть определены входе калибровки. В процессе калибровки измерялись комплексные

спектральные амплитуды $S_{11}(f)$ коэффициента отражения от входных зажимов антенны при различной высоте заивания БПЛА от ~ 1 м до 6 м над поверхностью почвы. Измерения проводились в полосе частот от $f = 100$ МГц до $f = 1.3$ ГГц (для первой ЛПА) и от $f = 200$ МГц до $f = 5.9$ ГГц (для второй ЛПА). Измеренные значения $S_{11}(f)$ в безграничном пространстве (высота полета БПЛА порядка 30 м) для первой ЛПА приведены в работах [29-31], для второй ЛПА приведены на рис. 3. Из трех последовательно сделанных измерений (см. рис. 3) следует, что вращение пропеллеров, излучение телеметрии на гармониках основной частоты 433 МГц, излучение WiFi модуля микрокомпьютера на частоте 2.4 ГГц (и ее гармониках) существенно не искажает спектр измеряемых значений $S_{11}(f)$.

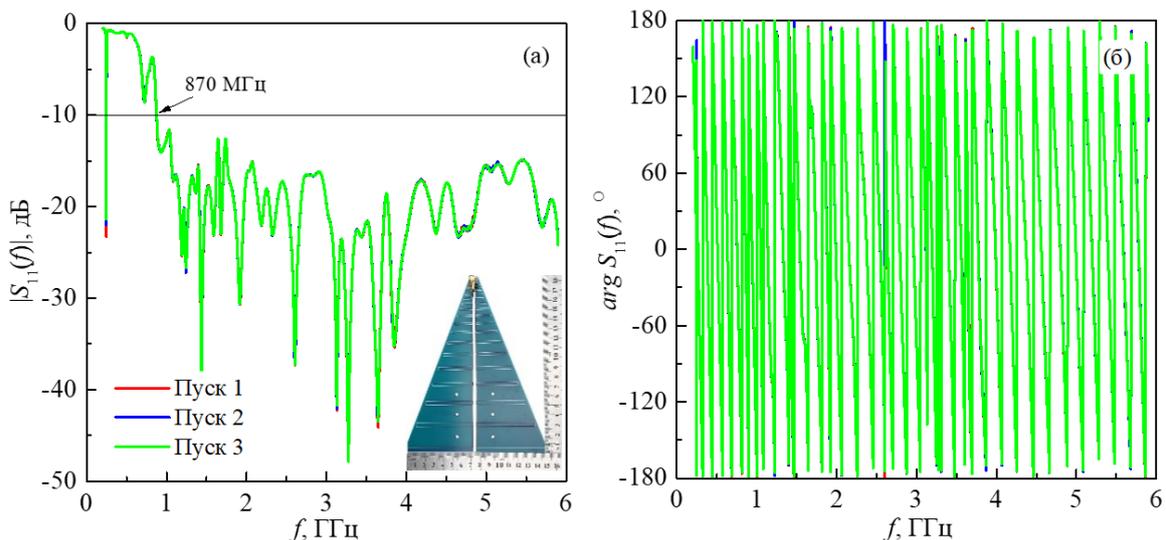


Рис. 3. Измеренные значения амплитуды (а) и фазы (б) $S_{11}(f)$ для второй ЛПА при высоте полета БПЛА около 30 м (приближение свободного пространства).

Полоса частот сверху не определена, т.к. измерения проводились до частоты 5.9 ГГц. Пуск 1-3 обозначают порядковый номер различных измерений с промежутком несколько секунд.

Форма синтезированного импульса (длительностью 3.5 нс со средней частотой $f_0 \sim 730$ МГц) при отражении от металлического экрана (листы латунной сетки $6 \text{ м} \times 7 \text{ м}$) в случае первой ЛПА можно увидеть в работе [29-32]. Синтезированный импульс (длительностью 0.8 нс со средней частотой $f_0 \sim 2.2$ ГГц), отраженный от металлического экрана с использованием второй ЛПА показаны на рис. 4. В результате проведенной калибровки могут быть выполнены импульсные

измерения абсолютной величины модуля коэффициента отражения $|R_s(f_0)|$ электромагнитной волны от диэлектрического полупространства (на средней частоте f_0 зондирующего импульса) по формуле:

$$|R_s(f_0)| = 2ds_{s,\max}(d), \quad (1)$$

где $s_{s,\max}(d) = s_s^a(t, d)|_{\max}$ – максимум огибающей импульса, отраженного от диэлектрического полупространства при измерении на высоте d .

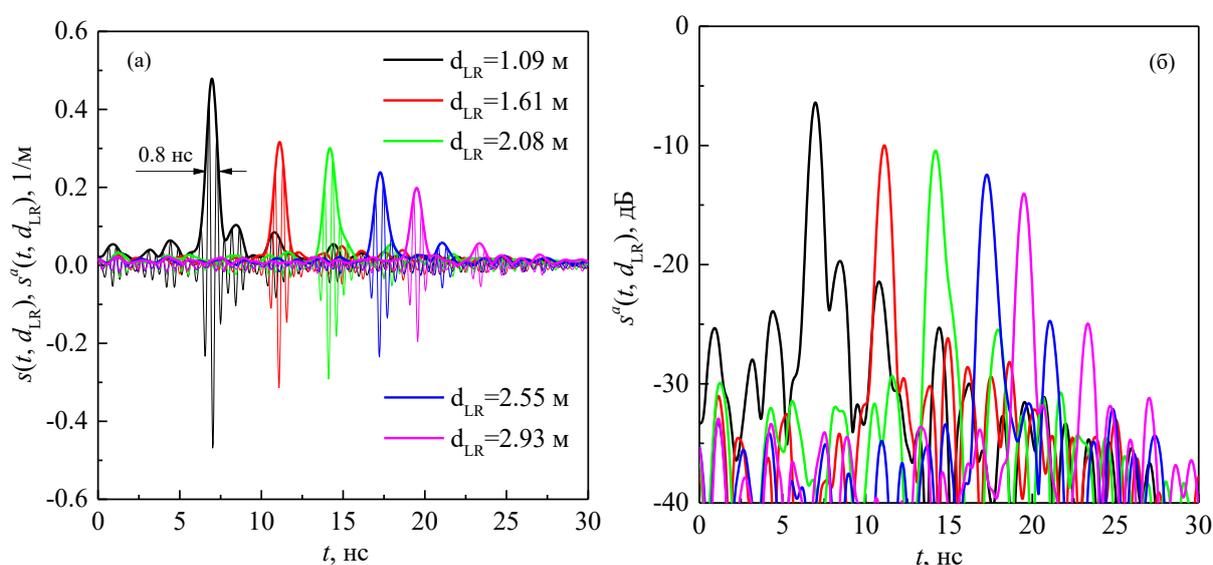


Рис. 4. Временные формы $s(t, d_{LR})$ и огибающие $s^a(t, d_{LR})$ синтезированных импульсов (вторая ЛПА), отраженных от металлического экрана при различной высоте d_{LR} зависания БПЛА в линейном (а) и логарифмическом (б) масштабе. Высота измеренная лидаром LIDAR-Lite v3 с БПЛА обозначена d_{LR} .

При различной высоте зависания БПЛА над латунным экраном после калибровки, измеренный модуль коэффициента отражения ($|R_{ref}(f_0)| = 2d \cdot s_{ref,\max}(d)$) оказался близок к единице $|R_{ref}(f_0)| = 1.017 \pm 0.005$ (в случае использования первой ЛПА, смотрите работу [32]) и $|R_{ref}(f_0)| = 0.982 \pm 0.037$ (в случае использования второй ЛПА, см. рис. 5а). Время задержки в обоих случаях использования первой и второй ЛПА с коэффициентом детерминации 0.999 [32] линейно пропорционально высоте d_{LR} , измеренной лазерным дальномером (см. работу [32] в случае первой антенны и рис. 5б в случае второй антенны). Отметим, что лазерный дальномер LIDAR-Lite v3 (ошибка измерения расстояния ± 2.5 см

до расстояния 40 м) крепился на раму БПЛА так, что калибровочная плоскость лазерного дальномера практически совпадала с фазовыми центрами ЛПА. Несмотря на то, что измерения сопровождались заметными порывами ветра получены вполне удовлетворительные результаты калибровки (см. рис. 5).

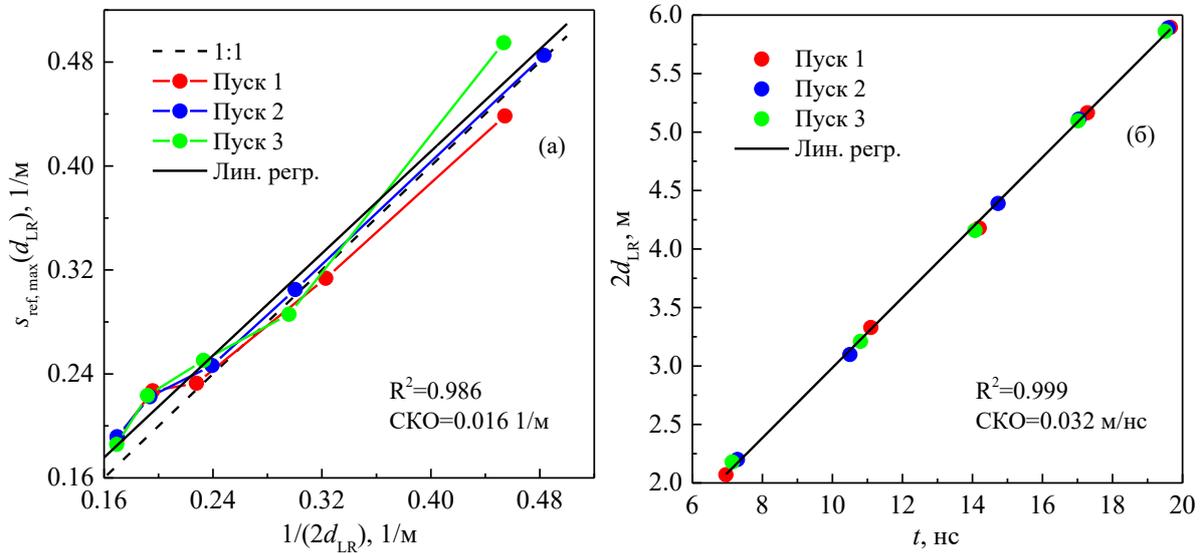


Рис. 5. Максимумы огибающих (а) и время запаздывания (б) синтезированных импульсов, отраженных металлического экрана в ходе калибровки при зависании БПЛА на различных высотах. Пуск 1-3 обозначают порядковый номер различных измерений с промежутком несколько секунд.

3. Результаты и обсуждение

Долговременные эксперименты по зондированию полей при зависании БПЛА над одной точкой. 1) В ходе экспериментов с 28 мая по 28 сентября 2023 г. на тестовых полях, засеянных ячменем, овсом и пшеницей были проведены измерения временных форм и огибающих импульсов, отраженных от почвенно-растительного покрова в двух диапазонах частот с использованием попеременно сменяемых ЛПА при различной высоте зависания БПЛА над одной и той же точкой тестовых полей. В качестве примера на рис. 6а приведены временные формы $s(t, d)$ и огибающие $s^a(t, d)$ импульсов, измеренные 8 июля 2023 г. на тестовом поле, засеянном пшеницей (высота пшеницы составляла ~ 39 см). Высота зависания БПЛА варьировалась от $d_{\text{рад}} = 1.60$ м до $d_{\text{рад}} = 5.54$ м. Затухание амплитуд огибающих импульсов (см. рис. 6а), в зависимости от $d_{\text{рад}}$ изображены на рис. 6б. Отметим, что $d_{\text{рад}}$ это высота БПЛА, измеренная не на основе данных

лазерного дальномера, а с использованием измеренных временных задержек t_d зондирующих импульсов и зависимости $d_{\text{rad}} = -0.026 + 0.1534 \cdot t_d$ (временные задержки указаны в нс), полученной при калибровке БПЛА-рефлектометра над металлическим экраном [32]. В данном случае мы пренебрегаем задержкой импульса при распространении в растительном покрове, величина которой может достигать порядка 0.15 нс (оценка получена в работе [33] для пшеницы различной высоты от 0 до 87 см и биомассой от 0 до 1.52 кг/м²).

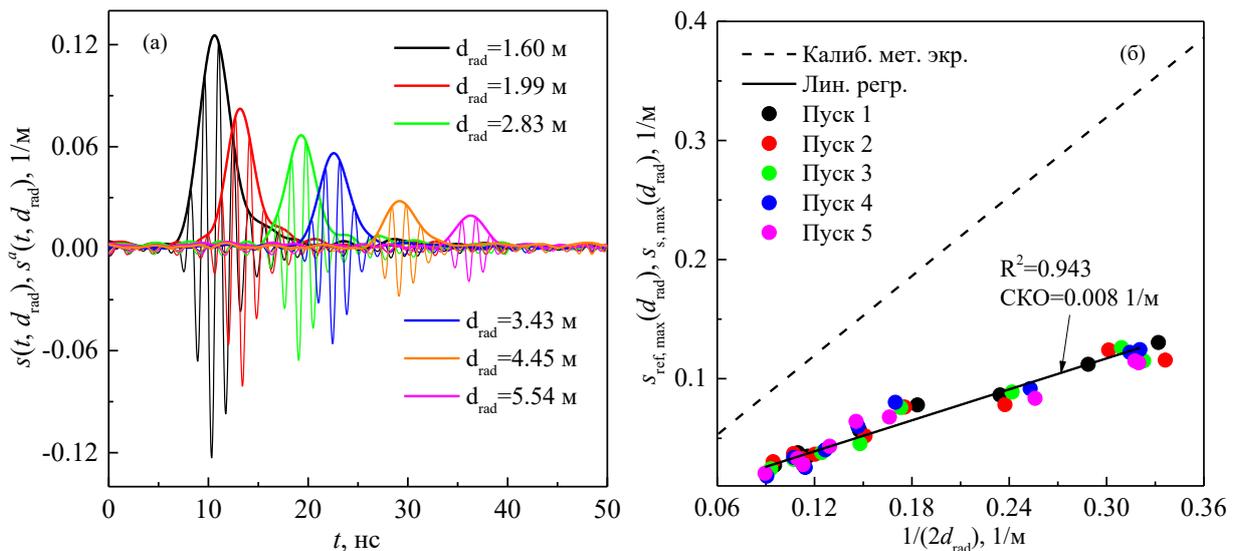


Рис. 6. Максимумы огибающих (а) некоторых импульсов, отраженных от почвенно-растительного покрова, и их зависимость от обратной удвоенной высоты зависания БПЛА (б) на поле. Измеренные от 8 июля 2023 на тестовом поле, засеянном пшеницей с высотой растений 40см.

Отметим, что принципиально по разнице $|d_{\text{LR}} - d_{\text{rad}}|$ можно оценить высоту растительного слоя, предполагая, что луч лазера отражается от верхней границы растительного слоя, а электромагнитный импульс от поверхности почвы. Однако обработанные данные за все время экспериментов показали, что величина $|d_{\text{LR}} - d_{\text{rad}}|$ от 1.7 до 2.6 раз занижает измеренную in-situ с помощью рулетки высоту растений на полях, засеянных ячменем, овсом и пшеницей при достаточно высоком значении коэффициента детерминации $\sim 0.68-0.97$.

Между амплитудами огибающих импульсов, отраженных от почвенно-растительного покрова, регистрация которых производилась на различных высотах зависания БПЛА, и двойным обратным расстоянием $1/2d_{\text{rad}}$

имеется линейная зависимость (коэффициент детерминации 0.943, см. рис. 6б). Построенные на основе всех экспериментальных данных подобные зависимости, также характеризуются высокими значениями коэффициентов детерминации от 0.77 до 0.96 (среднее 0.92). Наклон линии (см. рис. 6б, сплошная черная линия) в соответствии с моделью (1) определяет модуль коэффициента отражения. На рис. 6б в качестве сопоставления приведена калибровочная линия (штриховая), которая описывает значения максимумов огибающих импульсов $s_{\text{ref,max}}(d_{\text{LR}})$, отраженных от металлического экрана (тангенс угла наклона 1.017 [32]). Отметим, что значение модуля коэффициента отражения, определенное по наклону линии (см. рис. 6б, см. сплошная черная линия), является оценкой когерентной компоненты, так как получена в результате усреднения амплитуд импульсов, отраженных от почвенно-растительного покрова, при различной высоте полета БПЛА (в различных условиях повторности, сопровождавшихся вертикальными смещениями БПЛА в силу случайных факторов).

2) В соответствии с описанной выше методикой по наклону линейных зависимостей (аналогично тем, что изображены на рис. 6б, черная сплошная линия) были найдены модули коэффициентов отражения $|R^{\text{meas}}(f_0)|$ для всех тестовых полей в ходе всех экспериментов 2023 г. Далее была решена обратная задача по нахождению объемной влажности почвы W в ходе минимизации функционала, представляющего собой норму невязки между измеренными, $|R^{\text{meas}}(f_0)|$, и рассчитанными, $|R^{\text{th}}(f_{0,d}, C, W)|$, значениями модулей коэффициентов отражения:

$$W = \left[|R^{\text{meas}}(f_0)| - |R^{\text{th}}(f_{0,d}, C, W)| \right]_{\min}^2, \quad (2)$$

где $R^{\text{th}}(f_{0,d}, C, W) = \left| \frac{1 - \sqrt{\varepsilon_s(f_{0,d}, C, W)}}{1 + \sqrt{\varepsilon_s(f_{0,d}, C, W)}} \right|$ – модуль коэффициента отражения от

почвенного покрова без учета влияния степени шероховатости ее поверхности и растительного покрова, $\varepsilon_s(f_0, \rho_d, C, W)$ – относительная комплексная диэлектрическая

проницаемость (КДП) почвенного покрова, ρ_d – плотность сухого сложения, C – фракция частиц в почве менее 2 мкм (весовое содержание физической глины по классификации USDA). КДП почвенного покрова рассчитывалась на основе диэлектрической модели Миронова [34]. Плотность сухого сложения задавалась равной $\rho_d = 1.03 \text{ г/см}^3$ среднему значению, измеренному в слое 0-6 см на всех тестовых полях (за все время экспериментов ρ_d варьировалась от 0.72 г/см^3 до 1.43 г/см^3). Содержание глинистой фракции задавалась равной 37.8% среднему значению, измеренной в пахотном слое 0-20 см тестовых полей (агротехцентр ФГБУ ГЦАС «КРАСНОЯРСКИЙ»). Найденные таким образом объемные влажности почвы W_{retr} относительно синхронно измеренных in-situ значений W_{meas} на тестовых полях показаны на рис. 7 (см. зеленые символы и зеленую линию). Для сопоставления на рис. 7 (черные символы и черная сплошная линия) так же нанесены значения влажности почв, измеренные БПЛА-рефлектометром и контактным методом в случае почв, находящихся под паром (эксперименты 2022 г. см. работу [32]).

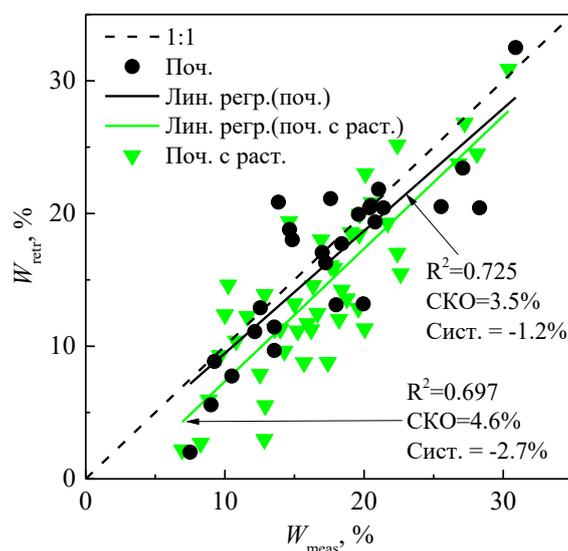


Рис. 7. Зависимость восстановленных значений объемной влажности почвы, покрывтой растительностью (зеленые символы) и находящейся под паром (черные символы, данные взяты из статьи [32]), от измеренных in-situ в слое 6-7 см датчиком EC-5 Decagon.

Видно, что восстановленные значения влажности почвы, покрывтой растительным покровом, в среднем на 2.7% занижены относительно

измеренных in-situ значений. При этом измерение влажности почвы достигается со среднеквадратическим отклонением (СКО), СКО = 4.6% и коэффициентом детерминации R^2 , $R^2 = 0.697$). Проведенные эксперименты по дистанционному зондированию влажности почвы как с борта БПЛА (средняя частота 730 МГц), так и с поверхности земли с использованием георадара ОКО-3 (антенный блок АБ900М3, средняя частота 750 МГц) [33], подтверждают слабое влияние растительного покрова сельскохозяйственных культур (при вариации биомассы в широком диапазоне значений от 0 до 3.04 кг/м²) на существенное ухудшение погрешности восстанавливаемых значений влажности почвы в слое 6-7 см.

Вместе с тем, в отличие от экспериментов [33], в которых на средней частоте 3.0 ГГц зондирующего импульса длительностью 0.5 нс (импульс формировался с использованием рупорной антенны П6-59М с полосой пропускания от 0.8 до 18.0 ГГц по уровню -10 дБ) уверенно регистрировались импульсы отраженные от границы воздух-растительность (пшеница высотой от 0 до 104 см и свежей биомассой от 0 до 2.3 кг/м²), при зондировании с БПЛА с использованием второй ЛПА ни в одном случае в ходе всех экспериментов на фоне шумов не были идентифицированы импульсы, отраженные от верхней границы растительного покрова (ячмень, овес, пшеница). В качестве примера на рис. 8 приведены огибающие импульсов записанные для пяти измерений проведенных примерно на высоте 3.12-3.38 м зависания БПЛА над уровнем почвы. В диапазоне времен задержек от 20 нс до 23 нс легко идентифицируются импульсы, отраженные от поверхности почвы. Однако на фоне шумов (которые обусловлены переотражением импульсов между приемо-передающей антенной и элементами конструкции БПЛА и др. случайных факторов, которые не были учтены методикой калибровки) невозможно однозначно выделить импульсы, отраженные от границы воздух-растительность и от внутренних элементов растительного покрова (см. рис. 8а) по сравнению с экспериментами [33] (см. рис. 8б). В экспериментах [33] подобные импульсы легко идентифицировать при уменьшении высоты растительности (см. рис. 8б) во временном интервале

от 34.5 нс до 39.5 нс. Для объяснения данного расхождения в экспериментах необходимы дополнительные исследования.

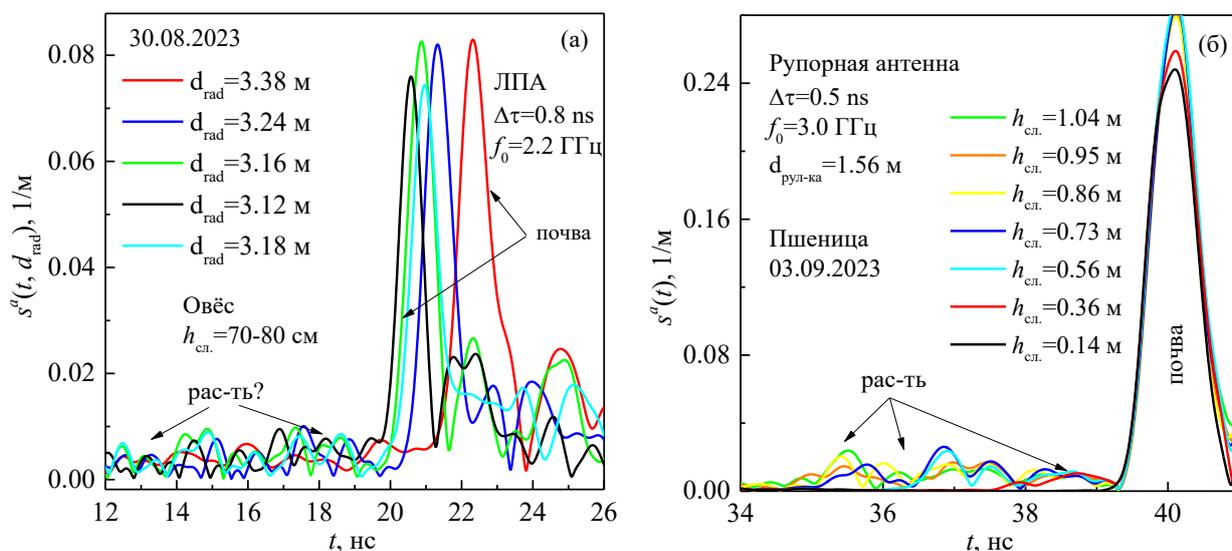


Рис. 8. Огибающие импульсов, отраженных от растительно-почвенного покрова на тестовом поле, засеянном овсом (а) 30.08.23 (влажность почвы 22%) и пшеницей (б) 03.09.23 (влажность почвы 17%, высота подвеса рупора 156 см) при зондировании с БПЛА на различных высотах зависания d_{rad} (а) и при наземном зондировании рупорной антенной Пб-59М – рисунок модифицирован из статьи [33] (б).

3) Степень влияния растительного покрова и неровностей поверхности почвы при восстановлении влажности почвы с борта БПЛА в МГц диапазоне частот с использованием первой ЛПА, может быть оценена на основе величин коэффициентов детерминации найденных при линейной регрессии зависимостей аналогично той, что изображена на рис. 6б (см. черную сплошную линию). Видно, что как с увеличением СКО высот неровностей поверхности почвы σ_r (в экспериментах 2022 г. на открытой почве [32]), так и в экспериментах 2023 г. на тестовых полях с увеличением высоты посевов овса, пшеницы и ячменя (см. рис. 9) коэффициент детерминации уменьшается. Это связано с ухудшением линейности зависимостей (см. рис. 6б, сплошная черная линия), а также дисперсией измеренных коэффициентов отражения (см. точки на рис. 6б) на отдельных высотах зависания БПЛА. В случае почвы, покрытой растительным покровом флуктуации R^2 значительно больше, чем для открытой почвы (см. рис. 9). Что указывает на дополнительное случайное влияние

элементов растительного покрова на флуктуации регистрируемой амплитуды отраженных зондирующих импульсов, несмотря на проводимые многократные усреднения (см. описание методики выше). Данные обстоятельства указывают на ограниченность предложенной методики при однократном измерении БПЛА-рефлектометром. По-видимому, будет иметь тенденция к большим флуктуациям амплитуды регистрируемых зондирующих импульсов, с большими величинами СКО высот неровностей поверхности почвы, высот и биомассы растительности.

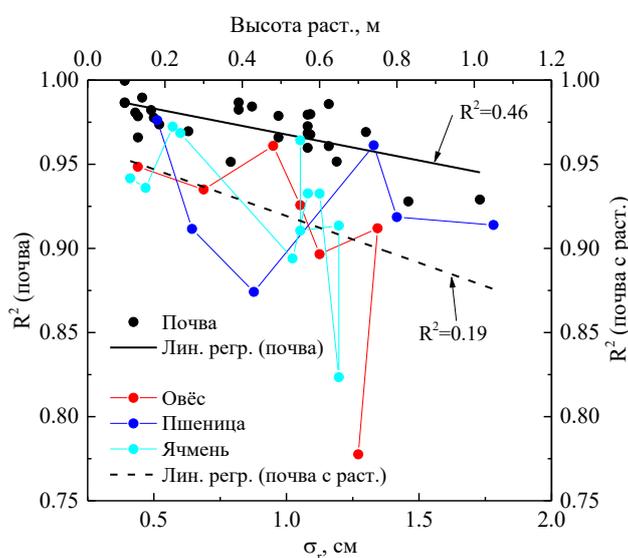


Рис. 9. Коэффициенты детерминации линейных зависимостей (см. рис. 6б, сплошная черная линия) найденных в ходе экспериментов с БПЛА в 2022 г в зависимости от СКО высот неровностей поверхности почвы σ_r не покрытой растительностью и в 2023 г. в зависимости от высоты растительности на тестовых полях.

Долговременные эксперименты по площадному зондированию полей при однократной съемке с БПЛА. Для демонстрации практически достижимых погрешностей восстановления влажности почвы при однократном зондировании подстилающей поверхности в 2024 г. были проведены эксперименты по дистанционному зондированию тестовых полей, засеянных овсом и пшеницей при однократном излучении и приеме зондирующего импульса на фиксированной высоте полета БПЛА (высота порядка 3.5-6 м над поверхностью почвы). В качестве примера на рис. 10 приведена карта объемной влажности

почвы, построенная на основе однократных измерений с БПЛА на фиксированной высоте полета в пространственно-распределенных точках на поле (красные точки). Расстояние между точками порядка 5-8 м в связи с чем измерения считались точечными без учета перекрытия «пятен» зондирования.

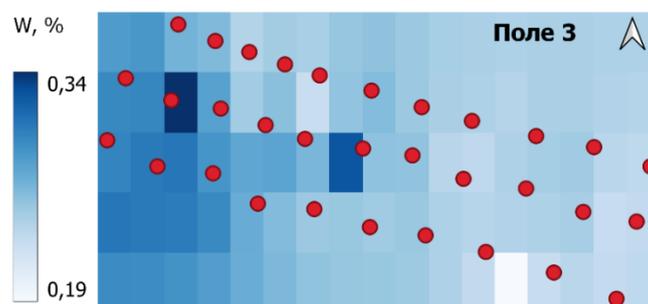


Рис. 10. Восстановленные значения влажности почвы при зондировании с БПЛА поля с посевами пшеницы 01.08.2024г.

Карта построена интерполяционным методом обратных взвешенных расстояний на основе точечных измерений БПЛА-рефлектометром (красные точки) без учета размеров пятна зондирования. Высота зависания БПЛА варьировалась от точки к точке в пределах 3.6-3.9 м.

Аналогично (см. рис. 10) были обработаны данные дистанционного зондирования БПЛА-рефлектометра, восстановлены значения влажности почв под посевами и сопоставлены с наземными данными контактных измерений с помощью датчика EC-5 Decagon для четырех полей в разное время (см. рис. 11).

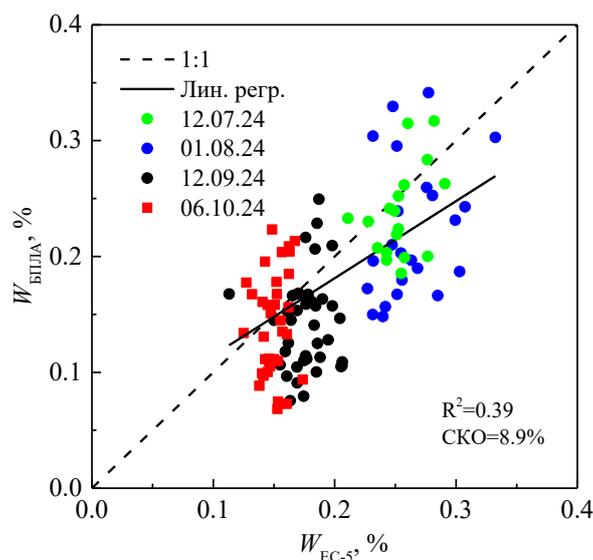


Рис. 11. Объемная влажность почвы тестовых полей, засеянных пшеницей (зеленые и черные символы) и овсом (синие и красные символы), измеренная с борта БПЛА и датчиками EC-5.

Из рис. 11 видно, что погрешность измерения влажности почвы БПЛА-рефлектометром при однократном измерении (СКО = 8.9%) примерно в 2 раза выше (а коэффициент детерминации $R^2 = 0.39$ в 1.8 раз меньше), по отношению к измерениям на основе многократных усреднений амплитуд импульсов (4.6%), регистрируемых при различной высоте зависания БПЛА над одной и той же точкой поля (сравните с рис. 7, зеленые символы). Также наблюдается систематическое занижение измеренных значений влажности почвы с БПЛА в среднем на 6% по отношению к данным контактных измерений датчиком ЕС-5.

Заключение

1) С одной стороны, в результате долговременных экспериментов по дистанционному зондированию почвы тестовых полей, засеянных ячменем, овсом и пшеницей в ходе естественных условий увлажнения и испарения, подтверждена практически значимая точность (среднеквадратическое отклонение 4.6% и коэффициент детерминации 0.697 относительно данных контактных измерений) измерения влажности почвы электромагнитными импульсами МГц диапазона частот (длительность 3.5 нс по уровню половины амплитуды, средняя частота в спектре 730 МГц по уровню -10 дБ) с борта БПЛА при многократных усреднениях амплитуды регистрируемого импульса. С другой стороны, однократные измерения влажности почвы на фиксированной высоте облета БПЛА тестовых полей увеличивают погрешность измерения влажности почвы практически в 2 раза при уменьшении коэффициента детерминации более, чем в 1.5 раза. По-видимому, из-за недостаточного усреднения амплитуд регистрируемых зондирующих импульсов наблюдаются значительные флуктуации однократно измеряемого с БПЛА коэффициентов отражения (за счет рассеяния волн на неровностях поверхности почвы и элементах растительного покрова), что приводит как к уменьшению коэффициента детерминации, так и к увеличению погрешности измерения влажности почвы с БПЛА в этом случае.

2) В случае многократных усреднений амплитуд зондирующих импульсов на разных высотах завивания БПЛА, в среднем для посевов ячменя, пшеницы, овса находящихся в различных стадиях вегетации, степени шероховатости поверхности почвы и естественно формирующихся профилей влажности почвы обнаружено хорошее соответствие между значениями влажности почв, измеренных дистанционно с БПЛА в МГц диапазон частот и контактном методом *in-situ*, позволяют судить о порядке толщины поверхностного слоя зондирования влажности почвы с БПЛА не менее, чем 6-7 см (на частоте 730 МГц). Для данного диапазона частот в пределах достигнутых погрешностей можно пренебречь влиянием степенью шероховатости поверхности почвы < 2 см, высотой и биомассой указанных видов растительного слоя (до 1.1 м и 3.1 кг/м², соответственно).

3) Использование импульса ГГц диапазона частот (длительность 0.8 нс, средняя частота 2.2 ГГц) на фоне шумовых импульсных пульсаций впереди фронта зондирующего импульса не позволило идентифицировать импульсы, отраженные ни от границы воздух-растительность, ни от элементов растительного покрова при зондировании с БПЛА, появление которых было надежно установлено в наземном эксперименте в работе [33]. Отметим, что главная причина шумовых импульсных пульсаций впереди фронта зондирующего импульса заключается в синтезировании импульса «звенящей» логопериодической антенной (в условиях ближнего размещения на динамической конструкции БПЛА), для устранения искажений которой применяется методика аналогичная методу инверсной фильтрации [29-31]. Применение «нерезонансных» антенн с экранированием боковых и задних лепестков антенны, а также совершенствование методики [29-31], должно позволить улучшить отношение сигнал/шум (относительно синхронных помех) и позволит зарегистрировать с БПЛА импульсы, отраженные растительным покровом.

4) Эксперименты с лидаром (Garmin LIDAR Lite V3, точечные измерения) не позволили надежно измерить положение верхней границы растительного

покрова. По-видимому, применение сканирующих лидаров картографического класса, например Velodyne LiDAR Puck [35] позволят решить данную проблему. Вместе с тем, повышение частоты и уменьшение длительности зондирующих импульсов ГГц диапазона является также одним из путей для надежного измерения отражений от верхней границы растительного покрова, что в комбинации с импульсами МГц позволит измерять не только высоту, но и на основе методики аналогичной [33] восстанавливать биомассу растительного покрова. Отметим, что в отличие от лидарных методов, которые в случае плотного растительного покрова не могут надежно измерить отражение от поверхности почвы, а следовательно и не в состоянии измерить высоту посевов, электромагнитные методы импульсного зондирования потенциально позволяют преодолеть данные ограничения.

5) Как отмечалось выше одним из существенных недостатков предложенного метода является необходимость многократных измерений модуля коэффициента отражения на различных высотах зависания БПЛА над поверхностью почвы с целью более достоверной оценки когерентной компоненты модуля коэффициента отражения. Одним из направлений преодоления этого ограничения является уменьшение диффузного рассеяния волн на неровностях поверхности почвенного покрова и элементах растительности путем уменьшения средней частоты и увеличения длительности зондирующего импульса. С одной стороны, увеличение длительности зондирующего импульса будет способствовать большему пространственному и объемному усреднению, однако приведет к ухудшению разрешающей способности. С другой стороны, уменьшение средней частоты зондирующего импульса ниже 100-300 МГц за счет релаксаций Максвелла-Вагнера почвенной воды будет приводить все к уменьшающейся чувствительности и однозначности электромагнитного метода измерения влажности почв, вследствие нарушения в этом диапазоне частот прямо пропорциональной связи КДП почвы с ее влажностью [36,37].

Финансирование: Работа выполнена в рамках проекта региональных конкурсов РНФ и Красноярского краевого фонда науки № 22-17-20042.

Литература

1. Khang A. et al. Handbook of Research on AI-Equipped IoT Applications in High-Tech Agriculture. Hershey, PA: IGI Global.– 2023.– 473 p.
2. Zaman Q. et al. Precision Agriculture Evolution, Insights and Emerging Trends. Academic press. Elsevier.– 2023.– 260 p.
3. Cognitive Technologies. Available online: URL: <https://cognitivepilot.com/breaking-news/vopros-otvet-o-rabote-novogo-avtopilota-na-traktorah-kirovecz-k-7m/> (accessed on 01.07.2024).
4. Bertalan L., Holb I., Pataki A. et al. UAV-based multispectral and thermal cameras to predict soil water content–A machine learning approach// Computers and Electronics in Agriculture.– 2022.– V. 200.– p. 107262.
5. Guan Y., Grote K. Assessing the Potential of UAV-Based Multispectral and Thermal Data to Estimate Soil Water Content Using Geophysical Methods// Remote Sens.– 2024.–V. 16.– No. 61.– p. 1-23.
6. Lu F., Sun Y., Hou F. Using UAV Visible Images to Estimate the Soil Moisture of Steppe// Water.– 2020.–V. 12.– p. 2334.
7. ten Harkel J., Bartholomeus H., Kooistra L. Biomass and Crop Height Estimation of Different Crops Using UAV-Based Lidar// Remote Sens.– 2020. V. 12. No. 17. – p. 1-18.
8. Bates J.S., Montzka, C., Schmidt M., Jonard F. Estimating Canopy Density Parameters Time-Series for Winter Wheat Using UAS Mounted LiDAR// Remote Sens.– 2021.– V. 13. –No. 4.– p. 1-21.
9. Huisman J.A., Hubbard S.S., Redman J.D., Annan A.P. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A review// Vadose zone journal.– 2003.– V. 2.–No. 4.–p. 476-491.

10. Tran A.P., Bogaert P., Wiaux F. et al. High-resolution space–time quantification of soil moisture along a hillslope using joint analysis of ground penetrating radar and frequency domain reflectometry data// *Journal of Hydrology*.– 2015.–V. 523.– p. 252-261.
11. Dehem M. Soil moisture mapping using a drone-borne Ground Penetrating Radar. *Faculté des bioingénieurs, Université catholique de Louvain. Thesis of master degree*.– 2020. 67 p.
12. Di Mauro A., Scozzari A., Soldovieri F. et al. Instrumentation and Measurement Technologies for Water Cycle Management// *Springer Water*.– 2022.– 599 p. (pp. 417-436).
13. Wu K., Desesquelles H., Cockenpot R. Ground-Penetrating Radar Full-Wave Inversion for Soil Moisture Mapping in Trench-Hill Potato Fields for Precise Irrigation// *Remote Sens*.– 2022.– V. 14.– No. 23.– p. 1-16.
14. Cheng Q., Su Q., Binley A. Estimation of surface soil moisture by a multi-elevation UAV-based ground penetrating radar// *Water Resources Research*.– 2023.– V. 59.– No. e2022WR032621.–p. 1-21.
15. Karpukhin V.I., Peshkov A.N. Measurement of height and biomass of vegetation canopy by radar method// *Proceedings of theory and technology of radar, radio navigation and radio communications in civil aviation. The Riga Institute of Civil Aviation Engineers*.– 1985.– p. 69-73.
16. Serbin G., Or D. Near-surface soil water content measurements using horn antenna radar: Methodology and overview// *Vadose Zone Journal*.– 2003.–V. 2.–No. 4.– p. 500-510.
17. Serbin G., Or D. Ground-penetrating radar measurement of crop and surface water content dynamics// *Remote Sensing of Environment*.– 2005.– V. 96.– No. 1. P. 119-134.

18. Serbin G., Dani O.R. Frequency-domain analyses of GPR waveforms: Enhancing near-surface observational capabilities// In proceedings of symposium S7 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, IAHS Publ.– 2006.– V. 303.–p. 274-285. Available online: <https://iahs.info/uploads/dms/13440.36-274-285-S7-29-serbin.pdf>
19. 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.–V. 9.– No. 1.– p. 18-28.
20. 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.
21. Pramudita A.A., Wahyu Y., Rizal S. et al. Soil water content estimation with the presence of vegetation using ultra wideband radar-drone// IEEE Access.– 2022.–V. 10.–p. 85213-85227.
22. Topp G.C., Davis J. L., Annan A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines// Water Resour. Res.– 1980.– V. 16.–No. 3.– p. 574–582.
23. Jonard F., Weihermuller L., Jadoon K.Z. et al. Mapping field-scale soil moisture with L-band radiometer and ground-penetrating radar over bare soil// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.– 2011.– V. 49.– No. 8.–p. 2863-2875.
24. Kim K.Y. et al. Precision Soil Moisture Monitoring With Passive Microwave L-Band UAS Mapping// IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing.–2024.–V. 17.– p. 7684-7694.
25. Dai E., Gasiewski A. J., Venkitasubramony A. et al. High Spatial Resolution Soil Moisture Mapping Using a Lobe Differencing Correlation Radiometer on a Small Unmanned Aerial System// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.– 2021, 59, 5, 4062-4079. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.3005385> .
26. Gleich D. SAR UAV for soil moisture estimation// 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR), Bali, Indonesia.– 2023.– pp. 1-4.

27. Farhad M., Gurbuz A.C., Kurum M. et al. Soil Moisture Mapper: a GNSS-R approach for soil moisture retrieval on UAV// AI for Agriculture and Food Systems.– 2022.– p. 1-4.
28. Wu K., Rodriguez G.A., Zajc M. et al. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping// Remote Sensing of Environment.– 2019.– V. 235.– No. 111456.
29. Muzalevskiy K. LPDA Calibration Using an UAV for Synthesizing UWB Impulses// IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters.– 2023.– V. 22.–No. 9.– p. 2140-2144.
30. Muzalevskiy K., Mikhaylov M., Ruzicka Z. Synthesizing of UltraWide Band Impulse by means of a Log-Periodic Dipole Antenna. Case Study for a Radar Stand Experiment// IEEE International Multi Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Yekaterinburg, Russian Federation.– 2022.– p. 1140-1143.
31. Muzalevsky K.V. Synthesis of an Ultra-Wideband Pulse by a Log-Periodic Antenna with Continuous Excitation by Harmonic Oscillations// Radiophysics and Quantum Electronics.– 2023.–V. 65.– No. 8.– p. 615-623.
32. Музалевский К.В., Фомин С.В., Каравайский А.Ю., и др. Зондирование влажности почвы сверхширокополосными электромагнитными импульсами с борта беспилотного летательного аппарата// Журнал радиотехники и электроники.–2024. –№7 (принята к печати).
33. Muzalevskiy K., Fomin S., Karavaevskiy A., Leskova J., Lipshin A., Romanov V. Measuring Biophysical Parameters of Wheat Canopy with MHz- and GHz-Frequency Range Impulses Employing Contactless GPR// Remote Sens.– 2024.– T. 16.–№ 19.– с. 3547.
34. Mironov L., Bobrov P.P., Fomin S.V. Dielectric model of moist soils with varying clay content in the 0.04 to 26.5 GHz frequency range. International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON).– 2013. p. 1-4.
35. Yuan W, Li J, Bhatta M, Shi Y, Baenziger PS, Ge Y. Wheat Height Estimation Using LiDAR in Comparison to Ultrasonic Sensor and UAS// Sensors (Basel).– 2018– V. 18.– No. 3731. p. 1-20.

36. Bobrov P. P., Kroshka E. S., Muzalevskiy K. V. The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies From 10 kHz to 8 GHz–Part II: Broadband Analysis// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.– 2024.– V. 62.– No. 2000411.–p. 1-11.
37. Bobrov P. P., Belyaeva T. A., Kroshka E. S., Rodionova O. V. The Effect of Dielectric Relaxation Processes on the Complex Dielectric Permittivity of Soils at Frequencies From 10 kHz to 8 GHz–Part I: Experimental// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.–2022.–V. 60.– no. 2005409.– p. 1-9.

Для цитирования:

Музалевский К.В. Измерение влажности агропочв под посевами ячменя, пшеницы и овса электромагнитными импульсами с борта беспилотного летательного аппарата. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №.5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.7>