

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.1>

УДК 621.369.9

ЗОНДИРОВАНИЕ ВОДНОГО ЭКВИВАЛЕНТА СНЕЖНОГО ПОКРОВА ШИРОКОПОЛОСНЫМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ С БОРТА БПЛА

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 15 июля 2021 г.

Аннотация. В работе исследовалась возможность дистанционного зондирования с борта беспилотного летательного аппарата-квадрокоптера (БПЛА) широкополосным импульсом длительностью 1,05 нс снежного покрова тестового участка сельскохозяйственного поля в районе пос. Минино, Красноярский край, с 23 ноября 2020 по 4 марта 2021 гг. Для формирования, излучения и приема широкополосных импульсов использовалась логопериодическая антенна (полоса пропускания от 1,36 ГГц до 4,89 ГГц) и компактный векторный анализатор цепей САВАН R60 (ООО «Планар», г. Челябинск). Показано, что как при наземном, так и дистанционном зондировании с борта БПЛА временные задержки между импульсами, отраженными от границы воздух-снег и снег-почва, линейно зависят от водного эквивалента снежного покрова, измеренного на тестовом участке. При этом наклон этих линейных зависимостей определяется средней плотностью снежного покрова. Полученные экспериментальные результаты показывают перспективность развития дистанционных технологий радарного картирования основных характеристик снежного покрова с борта малых аэроплатформ, которые могут дополнить информационное обеспечение существующих систем, используемых в точном земледелии.

Ключевые слова: радиолокация, БПЛА, СШП импульсы, снежный покров, водный эквивалент снежного покрова, плотность снежного покрова, высота снежного покрова, мёрзлые почвы.

Abstract. In this paper the possibility of snow cover remote sensing from an unmanned aerial vehicle-quadrocopter (UAV) with using a broadband pulse of 1.05 ns duration was investigated on the agricultural field near Minino village, Krasnoyarsk Territory from November 23, 2020 to March 4, 2021. A log-periodic antenna (from 1.36 GHz to 4.89 GHz bandwidth) and a compact vector network analyzer CABAN R60 (LLC Planar, Chelyabinsk) were used to generate, emit and receive broadband pulses. It is shown that both ground-based and remote sensing from the UAV, the time delays between pulses reflected from the air-snow and snow-soil interface linearly depend on the snow water equivalent, measured at the test site. The slope of these linear dependences is determined by the average density of the snow cover. The obtained experimental results show the promising of development of remote sensing technology for radar mapping of the main characteristics of the snow cover from UAV, which can supplement the information support of existing systems used in precision farming.

Key words: radiolocation, UAV, ultra-wideband pulses, snow cover, snow water equivalent, snow density, height of snow cover, frozen soil.

Введение

Происходящая в настоящее время революция в области создания доступных миниатюрных радиоэлектронных устройств обеспечивает бурное развитие радиолокационных методов зондирования природных сред сверхширокополосными (СШП) электромагнитными импульсами с платформ сверхлегких летательных аппаратов (БПЛА). На фоне работ по СШП зондированию минных полей [1-4], влажности почвы [5, 6], имеется всего несколько работ, в которых исследовались возможности зондирования СШП импульсами толщины ледового [7], и снежного покрова [8-10] с платформ БПЛА. За последние десятилетия в России и за рубежом велись исследования в области дистанционного зондирования с борта самолета или вертолета СШП электромагнитными импульсами толщины ледового покрова на море, реках и озерах, деятельного слоя и грунтов в зоне вечной мерзлоты, толщины снежного

и растительного покровов [11-14], материковых льдов и ледников [15], толщины снежного покрова морских льдов [16] и ледников [17, 18]. С платформы сверхлегкого БПЛА возможности дистанционного зондирования СШП электромагнитными импульсами наносекундной длительности влагозапаса снежного покрова остаются слабо изученными [8, 9]. В данной работе, по-видимому, впервые в России, исследовалась принципиальная возможность дистанционного зондирования широкополосными импульсами водного эквивалента снежного покрова сельскохозяйственного поля с борта сверхлёгкого БПЛА (квадрокоптер).

1. Тестовый участок и данные полевых измерений

В качестве тестового участка, на котором производились измерения водного эквивалента снежного покрова (ВЭСП) с борта БПЛА, выбрано сельскохозяйственное поле (см. рис. 1) в районе пос. Менино, Красноярский край (56.086255 С.Ш., 92.67917 В.Д.). Внешний вид тестового участка представлен на фотографиях (см. рис. 2).

Зимой (2020-2021 гг.) в ходе полевых работ в нескольких местах на тестовом участке измерялась высота снежного покрова, в вертикальном разрезе снежного покрова визуально выделялись однородные слои, измерялась их толщина и отбирались образцы снежного покрова для измерения их плотности. Плотность снежного покрова определялась весовым методом. Характеристики снежного покрова тестового участка, измеренные в ходе полевых работ, приведены в таблице 1.

На тестовом участке снежный покров установился на следующий день после наступления заморозков 12 ноября 2020 г. 13-23 ноября 2020 г. толщина снега на тестовом участке была неоднородной и составляла 0,5-1,0 см. В период с 2 по 24 декабря 2020 г. наблюдались близкие к 0°C температуры воздуха, что привело к формированию талого, а затем промерзшего плотного слоя снежного покрова. В результате 24 декабря 2020 г. (см. табл. 1) сформировалась четко выраженная слоистая структура снежного покрова с тремя слоями. Трёхслойная структура снежного покрова (с центральным слоем сильно уплотненного снега)

сохраняется и после оттепели 6-8 февраля 2021 г. (см. табл. 1). В ходе оттепели 5-11 марта 2021 г. периодически подтаивает-замерзает верхний слой снега, а затем на поверхности снежного покрова формируется наст толщиной ~2см. После 4 марта 2021 г. на тестовом участке наблюдались также четырехслойные структуры снежного покрова с парными пропластами рыхлого (зернистый) и уплотненного снега. После 21 марта 2021 г. начался активный процесс таяния снега и измерения не проводились. Все измерения проводились в дни отрицательных температур воздуха, поэтому измеряемую плотность снега, указанную в табл. 1, будем относить к плотности сухого снежного покрова. Поверхностный слой почвенного покрова (толщиной более 5 см) в период полевых работ находился в мёрзлом состоянии.

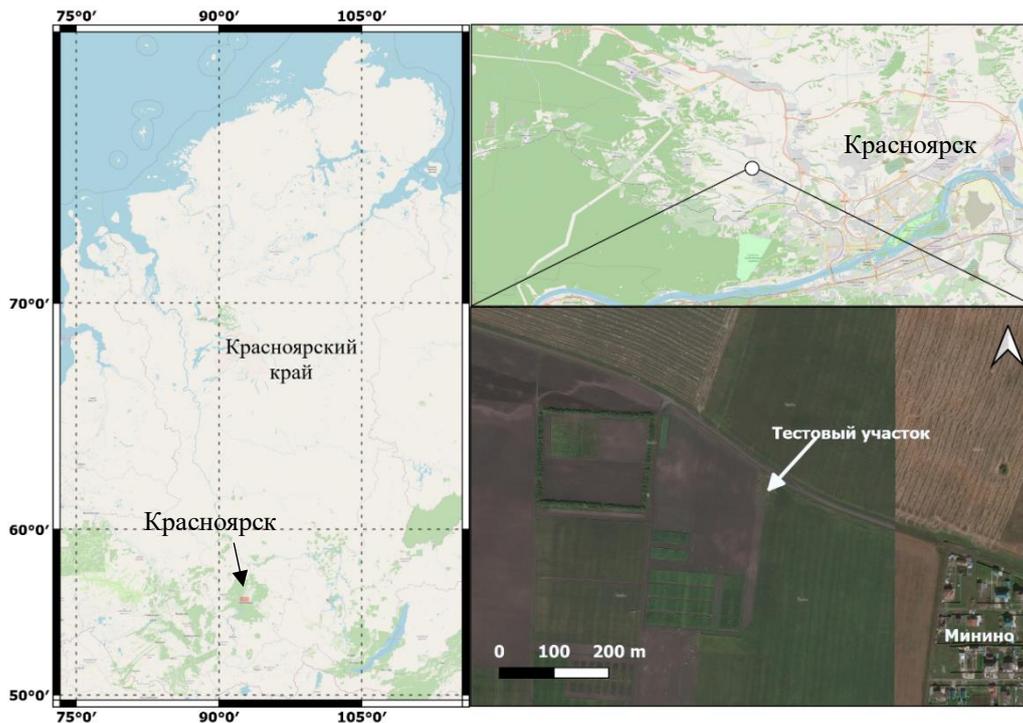


Рис. 1. Тестовый участок сельскохозяйственного поля в районе п. Минино, Красноярский край.



Рис. 2. Внешний вид тестового участка 23 ноября 2020 г. (слева) и 24 декабря 2020 г. (справа).

Таблица 1. Характеристики снежного покрова на тестовом участке.

Дата	Керн	Толщина слоя, см				Плотность в слое, г/см ³				Средняя плотность, г/см ³	ВЭСП ¹ , мм
		h ₁	h ₂	h ₃	h ₄	ρ ₁	ρ ₂	ρ ₃	ρ ₄		
23.11.20	1	5	-	-	-	0,17	-	-	-	0,17	8,5
02.12.20	2	8	-	-	-	0,23	-	-	-	0,23	18,4
24.12.20	3	6	6	2	-	0,215	0,326	0,09		0,21	34,3
	4	8	2	1	-						24,6
24.01.21	5	8	7	4	-	0,25	0,409	0,144	-	0,27	54,4
	6	10	1	7	-						39,2
04.03.21	7	10	2	21	-	0,285	0,447	0,267	-	0,33	93,5
	8	14	10	16	-						127,3
18.03.21	9	17	9	4	-	0,247	0,455	0,350	-	0,35	96,9
18.03.21	10	11	7	12	1	0,243	0,312	0,369	0,7	0,41	99,9
	11	12	12	4	6	0,247	0,369	0,242	0,35	0,30	104,6

¹ ВЭСП в зависимости от средней высоты, h_{sn} , и плотности, ρ_{sn} , снежного покрова рассчитывался по формуле: $ВЭСП = \frac{\rho_{sn}}{\rho_w} h_{sn}$, где $\rho_w \approx 1$ г/см³ - плотность воды.

2. Описание используемого БПЛА и методика формирования широкополосных импульсов

Дистанционное зондирование тестового участка осуществлялось с борта БПЛА с использованием прототипа широкополосного рефлектометра, собранного на основе векторного анализатора цепей SAVAN R60 производства ООО «Планар», г. Челябинск. Измерения векторным анализатором цепей проводились без усреднений с полосой фильтра промежуточной частоты, равной 3кГц в диапазоне частот от 10 МГц до 6 ГГц (4096 точек). На фиксированной высоте полета БПЛА производилось пять рефлектометрических измерений через 1 секунду. Внешний вид БПЛА приведен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид квадрокоптера. 1- Приемо-передающая антенна, 2-GPS антенна, 3-антенна радиуправления, 4- Pixhawk 4, 5-теплозащитный кожух, 6-разъем SAVAN R60 для подключения приемо-передающей антенны, 7-винтелеционное отверстие, 8-ультразвуковой высотомер (MaxBotix MB 1242), 9-лазерная рулетка UNI-T UT390B, 10-бортовой компьютер.

Четырёхроторный БПЛА (квадрокоптер) собран на раме Tarot Iron Man 650. Общий вес квадрокоптера порядка 2,2 кг, время полета ~15 минут (батарея 10000 мАч). Программно-управляемый автономный полет БПЛА был

реализован с использованием полетного контролера Pixhawk 4, через интерфейс MAVLink (библиотека MAVSDK), на языке Python. (Кроме встроенного в полетный контроллер датчика давления, дополнительно, для контроля высоты полета БПЛА, использовался лазерный высотомер UNI-T UT390B). Векторный анализатор цепей SABAN R60 управлялся программно (Python) с использованием текстовых команд стандарта SCPI (Standard Commands for Programmable Instruments) по протоколу TCP/IP (сокеты STREAM). Все программное обеспечение было установлено на бортовой компактный компьютер Intel Computer Stick BLKSTK1A32SC под управлением операционной системы Windows 10. В связи с тем, что бортовой компьютер не рассчитан на эксплуатацию при нулевых и отрицательных температурах воздуха, а также для термостабилизации векторного анализатора цепей, данные приборы были размещены в коробку, собранную из пенополистирола (см. рис. 3). Питание всех систем осуществлялось от батареи квадрокоптера.

Контроль параметров тонкой настройки автопилота БПЛА осуществлялся на компьютере наземной станции слежения (канала с БПЛА на частоте 433МГц) с использованием программы Qgroundcontrol [19]. Также на компьютере наземной станции осуществлялся дополнительный контроль процесса автономного полета БПЛА и процесса измерений рефлектметра по каналу WiFi через удаленный доступ к рабочему столу бортового компьютера БПЛА. Описанной системы управления и контроля БПЛА достаточно для ограниченных исследовательских задач по дистанционному зондированию небольших тестовых участков (порядка 1 га) в пределах прямой видимости ~1км. Для отработки и верификации всех алгоритмов работы аппаратуры и заданий полета использовался симулятор jMAVSim [20]. Задания полета БПЛА состояли в автономном взлете с дороги, расположенной в 50 м от тестового участка, зависание и проведение рефлектметрических измерений над тестовым участком в точке с заданной координатой (56.086255 С.Ш., 92.67917 В.Д.) на высоте 5 м и 50 м (калибровочные измерения) и далее приземление на площадку в месте взлета. Перед началом полета, БПЛА выдерживался 20 минут

при температуре окружающего воздуха при питании от запасного аккумулятора. Потом производились стандартные калибровки полетного контролера и полная однопортовая калибровка векторного анализатора цепей. Несмотря на то, что БПЛА выдерживался при температуре воздуха, которая во время экспериментов с 23 ноября 2020 г. по 4 марта 2021 г. варьировалась от -18°C до -3°C , и проводилась полная калибровка полетного контролера, высота полета БПЛА в каждом случае зондирования была различна. Полетный контролер был настроен на автоматическую обработку данных с GPS и барометра, системы RTC (Real Time Kinematic) GPS, ГЛОНАСС не использовались). Фактическая высота полета БПЛА (исключая калибровочные измерения на высоте 50 м) в момент зондирования по данным лазерного высотомера варьировалась от 2,18 до 4,62 м. На диск бортового компьютера записывались файлы, содержащие данные рефлектометрических измерений, в дополнительные «log» файлы записывалась информация о дате и времени измерений, координатах и абсолютной высоте (по барометру полетного контролера и лазерной рулетке) полета БПЛА, а также показания двух температурных датчиков.

Зондирование снежного покрова с борта БПЛА осуществлялось широкополосным импульсом, сформированным в соответствии с методикой работ [21, 22]. В качестве приемно-передающей антенны использовалась СШП логопериодическая антенна [23], внешний вид которой приведен на рис. 3, а S_{11} характеристика – на рис. 4. Влияние корпуса БПЛА существенно искажает S_{11} характеристику антенны (сравните синюю и красные кривые на рис. 4). Исследования искажений диаграммы направленности антенны не проводилось. Для устранения влияния межимпульсных пульсаций, обусловленных переотражением волн от антенны и элементов конструкции БПЛА, из $S_{11}^{H_0}(f)$ характеристики, измеренной на высоте H_0 полета БПЛА над поверхностью почвы, вычиталась $S_{11}^{air}(f)$ калибровочная характеристика, измеренная на высоте полета БПЛА равной 50 м (предполагалось, что влиянием отраженного

импульса от поверхности земли в этом случае можно пренебречь, режим свободного безграничного пространства).

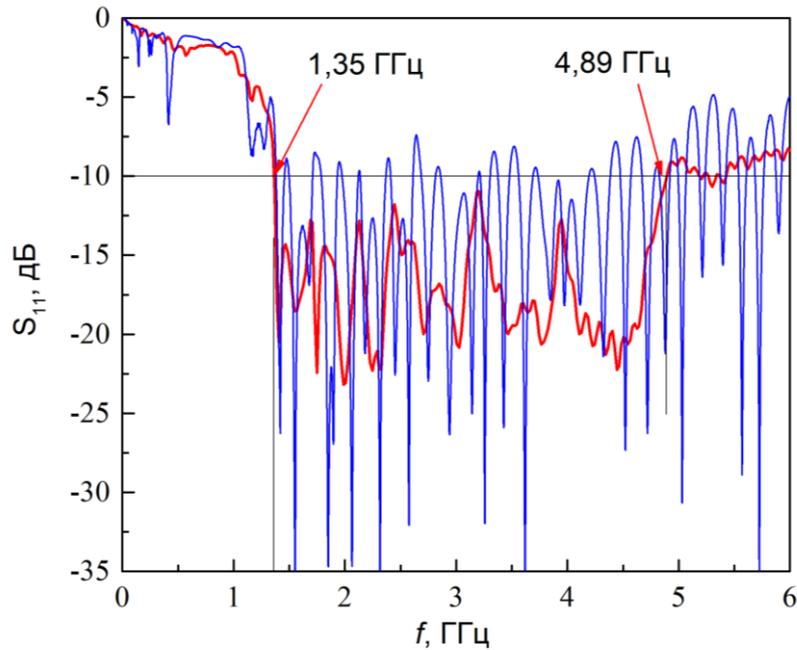


Рис. 4. S_{11} характеристика логопериодической антенны (см. рис. 3, указатель 1). Красная линия – антенна размещалась отдельно от БПЛА в свободном пространстве, синяя линия – антенна в рабочем положении на БПЛА при высоте полета 50м.

Аналитический сигнал $\dot{s}(t)$, зондирующих импульсов в соответствии с работами [21, 22] рассчитывался на основе формул:

$$\dot{s}(t) = 2 \int_{f_{min}}^{f_{max}} e^{-2i\pi ft} S(f), \quad S(f) = [S_{11}^{H_0}(f) - S_{11}^{air}(f)] K_{\alpha}(f), \quad (1)$$

где t время, $f_{min}=1,35$ ГГц и $f_{max}=4,89$ ГГц минимальная и максимальная частота в спектре $K_{\alpha}(f)$ оконной функции Чебышева при $\alpha=80$ дБ (параметр α задаёт в дБ уровень подавления боковых лепестков). Оконная функция Чебышева $K_{\alpha}(f)$ [24, 25] использовалась с целью минимизации длительности главной части синтезируемого импульса. Окончательно временные формы импульсов, $s(t)$, и их огибающие, $\hat{s}(t)$, рассчитывались по формулам:

$$s(t) = Re \dot{s}(t), \quad \hat{s}(t) = |\dot{s}(t)|. \quad (2)$$

3. Временные формы импульсов, отраженных слоистой структурой снежного покрова при зондировании тестового участка

Временные формы отраженных импульсов от слоистой структуры снежно-почвенного покрова, измеренные с борта БПЛА в дни зондирования тестового участка 4 марта 2021 г., 24 января 2021 г., 24 декабря 2020 г., 2 декабря 2020 г. и 23 ноября 2020 г., показаны на рис. 5.

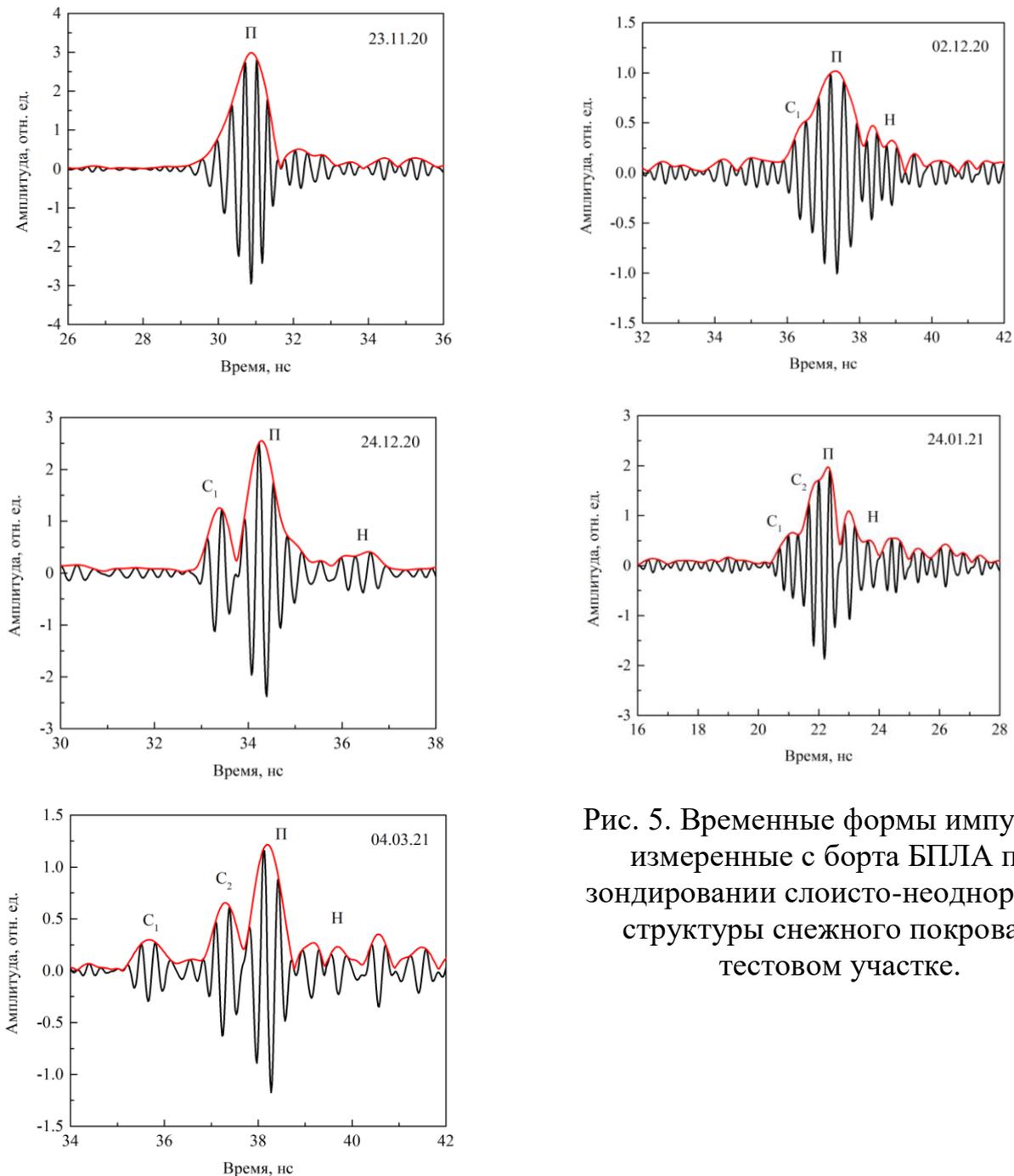


Рис. 5. Временные формы импульсов, измеренные с борта БПЛА при зондировании слоисто-неоднородной структуры снежного покрова на тестовом участке.

Из рис. 5 видно, что отраженные импульсы расположены в различных местах на временной шкале, что обусловлено различной высотой полета БПЛА

в каждом случае зондирования тестового участка. 23 ноября 2020 г. в условиях тестового участка, покрытого снежным покровом плотностью $0,17 \text{ г/см}^3$ и толщиной порядка 5 см (см. табл. 1), наблюдается один импульс, отраженный от слоистой структуры снежно-почвенного покрова (см. рис. 5, указатель «П»). Данный импульс преимущественно сформирован отражением от границы снег-почва, при этом импульс, отраженный от границы воздух-снег, едва угадывается в районе времен задержек 29,5-30,5 нс. 2 декабря 2020 г. при увеличении высоты снега до 8 см и плотности до $0,23 \text{ г/см}^3$ снежного покрова (см. табл. 1), импульс, отраженный от границы воздух-снег (см. рис. 5, указатель «С₁») становится различим на фоне большего по амплитуде импульса, отраженного от границы снег-почва (см. рис. 5, указатель «П»). Также после прихода импульса, отраженного от границы снег-почва (см. рис. 5, указатель «П»), следует группа импульсов (см. рис. 5, указатель «Н»), которые затруднительно проинтерпретировать (отражение от внутренних слоев мерзлой почвы или переотражение от границ воздух-снег-снег-почва). Для интерпретации данных импульсов необходим более «тонкий» эксперимент и данные наземных измерений слоистой структуры почвенного покрова.

24 декабря 2020 г. по мере накопления снежного покрова (11-14 см) импульсы, отраженные от границы воздух-снег и снег-почва, уверенно идентифицируются. При этом влияние верхнего слоя снега 1-2 см толщиной и плотностью $0,09 \text{ г/см}^3$ не может быть идентифицировано по временной форме импульса (см. рис. 5, 24.12.20 г, указатель «С₁»). По мере формирования трёхслойной структуры снежного покрова 24.01.21-04.03.21 (см. табл. 1) в ходе дистанционного зондирования 24.01.21 и 04.03.21 на временных формах импульсов хорошо различимы отраженные импульсы как от границы воздух-снег (см. рис. 5, 24.01.21, указатель «С₁»), снег-почва (см. рис. 5, 24.01.21, указатель «П»), так и от границы снег-снег внутри снежного покрова (см. рис. 5, 24.01.21, указатель «С₂»).

На основе данных, представленных на рис. 5, были измерены временные задержки Δt (по максимуму огибающих) между импульсами, отраженными от

границы воздух-снег (см. рис. 5, указатель «С₁») и снег-почва (см. рис. 5, указатель «П»). ВЭСП, измеренный контактным методом на тестовом участке, в зависимости от рассчитанных таким образом временных задержек импульсов, приведены на рис. 6 (см. красные заштрихованные звёзды).

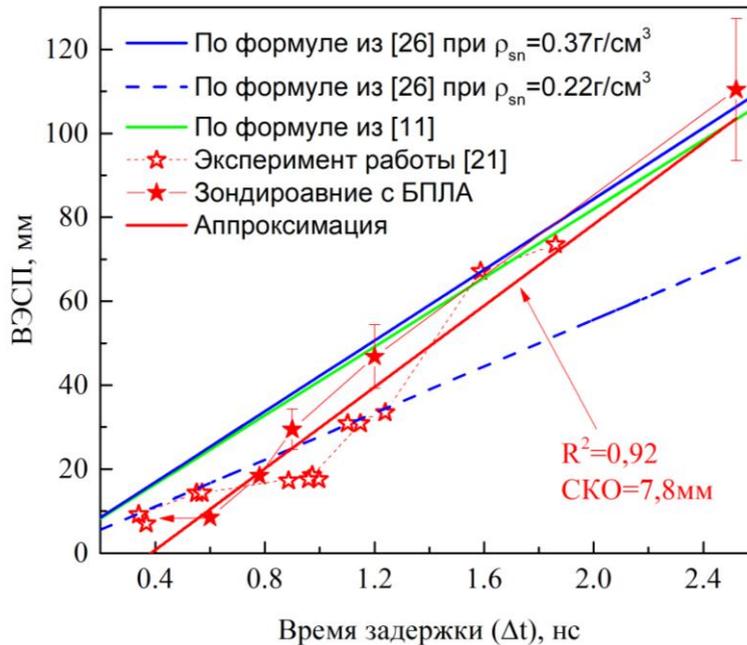


Рис. 6. Водный эквивалент снежного покрова в зависимости от времени задержки между импульсами, отраженных от границы воздух-снег, и снег-почва. Синие линии рассчитаны по формуле из [26]: $VЭСП = 1,5 \cdot 10^{-3} \rho_{sn} \Delta t / (1 + 8,5 \cdot 10^{-4} \rho_{sn})$ [мм]. Зелёная линия рассчитана по формуле из [11]: $VЭСП = 47,6 \Delta t$ [мм]. Усами обозначен диапазон вариаций, измеренных ВЭСП на тестовом участке. Стрелкой (между временами задержки 0,4-0,6нс) показана оценка максимального времени задержки $\Delta t < 0,6$ нс на основе данных представленных на рис. 5 (23.11.20). Линейная аппроксимация экспериментальных данных (звёздочки): $-18,7 + 48,5 \Delta t$ (коэффициент детерминации, $R^2 = 0,92$, среднеквадратическое отклонение, СКО=7,8мм).

Как видно из данных, представленных на рис. 6, зависимость $VЭСП(\Delta t)$ подобна как в ходе наземного эксперимента по дистанционному зондированию (см. работу [21]), так и при зондировании с борта БПЛА тестового участка снежного покрова. Для времен задержек $\Delta t < 1,2$ нс ($VЭСП < 30$ мм) зависимость $VЭСП(\Delta t)$ хорошо описывается моделью [26] при $\rho_{sn} \sim 0,22$ г/см³ (средняя плотность до 24.01.21), а при $\Delta t > 1,2$ нс ($VЭСП > 30$ мм) при $\rho_{sn} \sim 0,37$ г/см³ (средняя плотность после 04.03.21). В случае сухого снежного покрова

плотность снега является определяющим фактором, влияющим на достоверную оценку ВЭСП по временной задержки между импульсами, отраженными от границы воздух-снег и снег-почва. Также данные на рис. 6 говорят о невозможности точной оценки высоты снежного покрова без достоверной информации о плотности снега.

Заключение

В данной работе исследовалась возможность дистанционного зондирования с борта БПЛА широкополосным импульсом длительностью 1,05 нс снежного покрова тестового участка сельскохозяйственного поля в районе пос. Монино, Красноярский край. Для формирования, излучения и приема широкополосных импульсов использовалась логопериодическая антенна (полосой пропускания от 1,36 ГГц до 4,89 ГГц) и компактный векторный анализатор цепей Caban R60 (ООО «Планар», г. Челябинск). Показано, что как при наземном, так и дистанционном зондировании с борта БПЛА временные задержки между отраженными импульсами от границы воздух-снег и снег-почва линейно зависят от водного эквивалента снежного покрова, измеренного на тестовом участке. При этом наклон данных линейных зависимостей определяется средней плотностью снежного покрова. В данной работе не ставилась задача всестороннего исследования процессов взаимодействия широкополосных импульсов со слоистой структурой снежно-почвенного покрова, а также картирования характеристик снежного и почвенного покрова по площади тестового участка с борта БПЛА. Вместе с тем, рассматривалась принципиальная задача излучения и приема отраженных от снежно-почвенного покрова широкополосных импульсов (в диапазоне отрицательных температур воздуха от -3°C до -18°C) с помощью компактных приемно-передающей логопериодической антенны и векторного анализатора цепей, смонтированных на сверхлегком БПЛА. Полученные экспериментальные результаты показывают перспективность разработки дистанционных технологии радарного картирования с борта малых аэроплатформ основных характеристик снежного покрова, которые могут

дополнить информационное обеспечение существующих систем, используемых в точном земледелии.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-45-240010, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда науки, договор No 33/19.

Литература

1. Šipoš D., Gleich D. A Lightweight and Low-Power UAV-Borne Ground Penetrating Radar Design for Landmine Detection. *Sensors*. 2020. Vol.20. No.8. P.2234.
2. Noviello C., Esposito G., Fasano G., Renga A., Soldovieri F., Catapano I. Small-UAV Radar Imaging System Performance with GPS and CDGPS Based Motion Compensation. *Remote Sensing*. 2020. Vol.12. No.20. P.3463.
3. García Fernández M. et al. Synthetic Aperture Radar Imaging System for Landmine Detection Using a Ground Penetrating Radar on Board an Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Access*. 2018. Vol.6. P.45100-45112.
4. Pérez Cerquera M., et al. *UAV for Landmine Detection Using SDR-Based GPR Technology, Robots Operating in Hazardous Environments Hüseyin Canbolat*. [online]. IntechOpen. 2017. Дата доступа: 15.07.2021. <https://www.intechopen.com/books/robots-operating-in-hazardous-environments/uav-for-landmine-detection-using-sdr-based-gpr-technology>
5. Kaundinya S. A UAS-based ultra-wideband radar system for soil moisture measurements. *IEEE Radar Conference*. Oklahoma City. 2018. P.0721-0726.
6. Wu K., Rodriguez G.A., Zajc M., Jacquemin E., Clément M., De Coster A., Lambot S. A new drone-borne GPR for soil moisture mapping. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol.235. No.111456.
7. Arnold E., Rodriguez-Morales F., Paden J., Leuschen C., Keshmiri S., Yan S., Ewing M., Hale R., Mahmood A., Blevins A., Mishra A., Karidi T., Miller B.,

- Sonntag J. HF/VHF Radar Sounding of Ice from Manned and Unmanned Airborne Platforms. *Geosciences*. 2018. No.8. P.182.
8. Jenssen R.O.R., Svein J. Drone-mounted UWB snow radar: technical improvements and field results. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. 2020. Vol.34. No.14. P.1930-1954.
9. Jenssen R.O.R., Jacobsen S.K. Measurement of Snow Water Equivalent Using Drone-Mounted Ultra-Wide-Band Radar. *Remote Sensing*. 2021. Vol.13. No.13. P.2610.
10. Eckerstorfer M., et al. *UAV-borne UWB radar for snowpack surveys*. [online]. Tromso Science Park, Tromso. 2018. 13 p. Дата доступа: 15.07.2021. https://norut.no/sites/default/files/norut_rapport_8-2018_0.pdf
11. Финкельштейн М.И., Карпухин В.И., Кутев В.А., Метелкин В.Н. *Подповерхностная радиолокация*. Москва, Радио и связь. 1994. 216 с.
12. Финкельштейн М.И., Кутев В.А. О зондировании морского льда при помощи последовательности видеоимпульсов. *Радиотехника и электроника*. 1972. Т.17. №10. С.2107-2112.
13. Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. *Радиолокация слоистых земных покровов*. М.: Советское радио. 1977. 176 с.
14. Финкельштейн М.И., Кутев В.А., Золотарев В.П. *Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии*. Москва, Недра. 1986. 128 с.
15. Arcone S., Yankielun N. 1.4 GHz radar penetration and evidence of drainage structures in temperate ice: Black Rapids Glacier, Alaska, U.S.A. *Journal of Glaciology*. 2000. Vol.46. No.154. P.477-490.
16. Kwok R., Kurtz N. T., Brucker L., Ivanoff A., Newman T., Farrell S. L., King J., Howell S., Webster M. A., Paden J., Leuschen C., MacGregor J. A., Richter-Menge J., Harbeck J., Tschudi M. Intercomparison of snow depth retrievals over Arctic sea ice from radar data acquired by Operation IceBridge. *The Cryosphere*. 2017. Vol.11. P.2571-2593.

17. Sold L. et al. Methodological approaches to infer end-of-winter snow distribution on alpine glaciers. *Journal of Glaciology*. 2013. Vol.59. P.1047-1059.
18. Gusmeroli A., Wolken G., Arendt A. Helicopter-borne radar imaging of snow cover on and around glaciers in Alaska. *Annals of Glaciology*. 2014. Vol. 55. No.67. P. 8-88.
19. Dronecode [online]. Qgroundcontrol. Дата доступа: 15.07.2021. <http://qgroundcontrol.com/>
20. PX4 autopilot. [online]. jMAVSim with SITL. Дата доступа: 15.07.2021. <https://docs.px4.io/master/en/simulation/jmavsim.html>
21. Музалевский К.В, Фомин С.В. Сверхширокополосное импульсное зондирование слоистой структуры снежно-почвенного покрова. Экспериментальное исследование. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.15>
22. Музалевский К.В. Сверхширокополосное импульсное зондирование слоистой структуры снежно-почвенного покрова. Теоретическое исследование. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. № 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.8.14>
23. EBAY [online]. Ultra Wideband Log Periodic Antenna. Дата доступа: 15.07.2021. <https://www.ebay.com.au/itm/1-35-9-5GHz-15W-Ultra-Wideband-Log-Periodic-Antenna-SMA-Connector-High-Accuracy-/183118828851>
24. Harris F.J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*. 1978. Vol.66. No 1. P.51-83.
25. Lynch P. The Dolph-Chebyshev Window: A Simple Optimal Filter. *Monthly Weather Review*. 1997. Vol.125. P.655-660.
26. Lundberg A., Thunehed H., Bergström J. Impulse Radar Snow Surveys – Influence of Snow Density. *Hydrology Research*. 2000. Vol.31. No.1. P.1–14.

Для цитирования:

Музалевский К.В. Зондирование водного эквивалента снежного покрова широкополосными электромагнитными импульсами с борта БПЛА. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.1>