

УДК 621.396.962

DOI 10.34822/1999-7604-2021-1-20-30

МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК СНЕЖНЫХ ПОКРОВОВ

Е. Л. Шошин

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

E-mail: shoshin6@mail.ru

Проведен анализ эффективности алгоритмов выделения территорий залегания снега и точности измерения влагозапаса снежных покровов методом спутниковой радиометрии. Рассмотрен метод комплексной дальнометрии для дистанционного измерения характеристик снежного покрова. Выполнен анализ погрешности измерения толщины снега при использовании импульсной, фазовой и частотной модуляции зондирующих сигналов. Приведены данные экспериментальных измерений характеристик снежной поверхности участка реки с борта вертолета. Описана техническая реализация средств беспилотного летательного аппарата, осуществляющего комплексное обследование земли в зимних условиях.

Ключевые слова: снежный покров, спутниковая радиометрия, комплексная дальнометрия, фазовая модуляция, беспилотный летательный аппарат.

METHODS OF REMOTE MEASUREMENT OF SNOW COVER CHARACTERISTICS

E. L. Shoshin

Surgut State University, Surgut, Russia

E-mail: shoshin6@mail.ru

The analysis of the effectiveness of algorithms for identifying areas of snow occurrence and the accuracy of measuring the moisture content of snow cover by satellite radiometry is carried out. The method of complex range-finding for remote measurement of snow cover characteristics is considered. The analysis of the measurement error of snow thickness using pulse, phase, and frequency modulation of probing signals is performed. The data of experimental measurements of the characteristics of the snow surface of the river section from the helicopter are presented. The technical implementation of the means of an unmanned aerial vehicle carrying out a comprehensive survey of the earth in winter conditions is described.

Keywords: snow cover, satellite radiometry, complex range-finding, phase modulation, unmanned aerial vehicle.

Введение

Измерение характеристик снежного покрова важно при прогнозировании весенних паводков, урожая, опасности схода лавин в горной местности и изучении особенностей формирования климатических условий в различных регионах. Данные спутниковой микроволновой радиометрии позволяют определить водный эквивалент снега – SWE (snow water equivalent) – и выделить границы территорий залегания снега, используя измерения радиояркостной температуры заснеженных территорий земной поверхности [1–4]. Практическое использование данных радиометрических спутников требует реализации эффективных алгоритмов выделения границ залегания снега и оценки SWE с приемлемыми показателями точности и надежности.

Дистанционное измерение характеристик снежного покрова может быть выполнено с использованием воздушных носителей [5]. Наиболее перспективными являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), способные за один сеанс преодолеть расстояние в 5–50 км, вы-

полнить в режиме онлайн видеосъемку маршрута и построить детализированные изображения земной поверхности и объектов.

Цель исследования – анализ эффективности и точности алгоритмов выделения границ залегания снега и измерения влагозапаса снежных покровов методом спутниковой радиометрии, разработка метода комплексной дальнометрии и анализ погрешностей оценки толщины снежного покрова с использованием импульсной, фазовой и частотной модуляции зондирующих сигналов.

Идентификация характеристик снежных покровов методом спутниковой радиометрии

К основным характеристикам снежного покрова относят его толщину, влагозапас, влажность, границы залегания и занимаемую площадь. Влагозапас снежного покрова связан с толщиной покрова h согласно формуле:

$$\text{SWE} = \rho \cdot h, \quad (1)$$

где ρ – плотность снега, г/см³.

Снежный покров характеризуется радиояростной температурой, аналогичной радиояростной температуре облаков, что затрудняет выделение районов залегания снега на спутниковых снимках. Основной особенностью радиометрических свойств снега является его способность поглощать радиоволны в ближней и коротковолновой инфракрасной части спектра, в отличие от радиометрических свойств облаков, проявляющихся в отражении радиоволн в том же радиоволновом диапазоне.

Спутниковые радиометры, такие как MODIS, способны реализовать радиометрическую съемку с широкой полосой захвата земной поверхности, выполнить измерение характеристик излучаемых радиоволн в видимом диапазоне, в ближнем, среднем и тепловом инфракрасном диапазонах, а также построить спутниковые изображения с разрешением 250, 500 и 1 000 м в одном пикселе. При идентификации характеристик снега с помощью MODIS используется «стандартизованный индекс различий снежного покрова» [6]:

$$\text{NDSI} = \frac{B4 - B6}{B4 + B6}, \quad (2)$$

где $B4$ и $B6$ – значения пикселей 4-го и 6-го каналов MODIS, получаемые в результате спектральной обработки радиометрических данных в диапазонах длин волн 0,545–0,565 мкм и 1,628–1,652 мкм соответственно. Индекс NDSI используется для построения спутниковых карт с выделенными районами залегания снега. При этом для выделения районов снега индекс NDSI должен превысить значение 0,4 [6]. На рис. 1 приведен пример построения спутникового изображения, сформированного MODIS/Terra для территории Западной Сибири с использованием индекса NDSI [7]. В тех случаях, когда спутниковая радиометрия земной поверхности выполняется в условиях сильной облачности и индекс NDSI не превышает порогового значения 0,4, выделения районов залегания снега не происходит. Основным недостатком используемых алгоритмов формирования изображений районов залегания снега методом спутниковой радиометрии является их критическая зависимость от состояния облачности, закрывающей земную поверхность.

Для оценки влагозапаса снежных покровов широко используются данные спутникового радиометра AMSU [8]. Пространственное разрешение формируемых с помощью AMSU/NOAA-15 изображений радиояростной температуры составляет 45×45 км в одном радиометрическом пикселе. В [2] предложены следующие алгоритмы оценки SWE:

- для слежавшегося снега с развитым метаморфизмом и возрастом более двух недель:

$$\text{SWE1} = 0,6 \cdot (\text{TB23} - \text{TB31}) + 1,71; \quad (3)$$

- для свежего не метаморфизированного снега возрастом несколько суток:

$$SWE2 = 0,08 \cdot (TB31 - TB89) + 1,15; \quad (4)$$

- для свежевыпавшего снега возрастом несколько часов:

$$SWE3 = 0,39 \cdot (TB23 - TB31) + 2,6; \quad (5)$$

где TB23, TB31 и TB89 – радиояркостные температуры, полученные по данным измерения AMSU на частотах 23 ГГц, 31 ГГц и 89 ГГц соответственно.

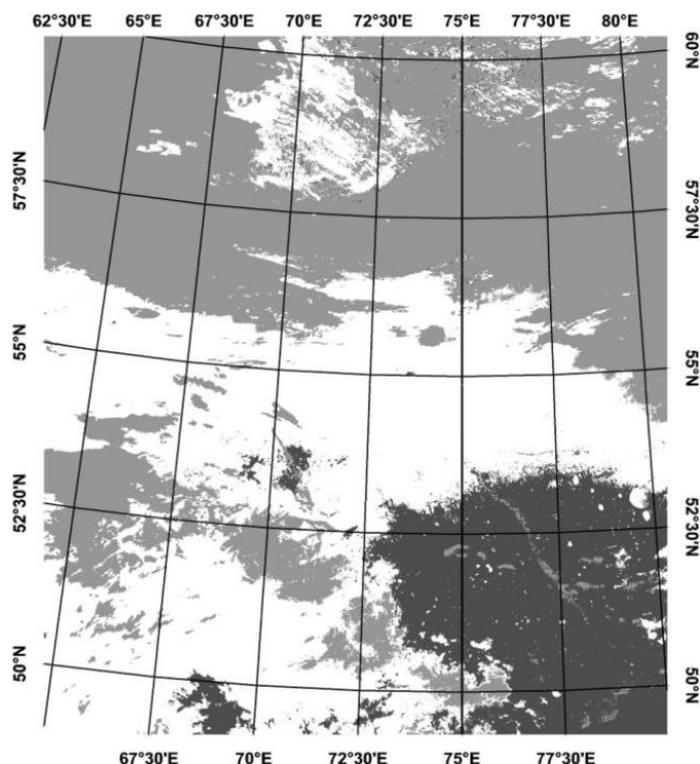


Рис. 1. Пример спутникового изображения территории Западной Сибири, полученного MODIS/Terra с использованием индекса NDSI [7]:
 темный тон – территории, свободные от снега;
 белый – территории, покрытые снегом; светло-серый – облачность

На рис. 2 отображены результаты наземных измерений SWE и значений SWE2, восстановленных по данным измерения TB31 и TB89 снежных покровов на южных территориях Омской области [3]. Приведенные данные свидетельствуют о значительных расхождениях реальных и восстановленных значений SWE для большинства элементов выборки в течение зимнего периода 2011–2012 гг. Относительная погрешность оценки SWE (δ_{SWE}) зависит от числа усредняемых значений SWE2. При этом δ_{SWE} достигает уровня в 40 % при объеме выборки рассчитанных значений SWE2, равном 40, и при дальнейшем увеличении выборки SWE2 асимптотически стремится к значению 32 %, представляющему собой нижнюю границу точности оценки влагозапаса с использованием двухчастотных алгоритмов спутниковой радиометрии. В [3] предложен трехчастотный алгоритм оценки влагозапаса:

$$SWE4 = 1,17 + 0,23 \cdot (TB31 + TB89) - 0,64 \cdot TB23, \quad (6)$$

который улучшает скорость сходимости оценки SWE, а точность оценки влагозапаса асимптотически стремится к 18 %. Следует отметить, что полученные результаты точности оценки

влажзапаса снега справедливы только по отношению к изученным районам Омской области, алгоритмы расчета SWE1–SWE4 нуждаются в проверке при их применении в других регионах.

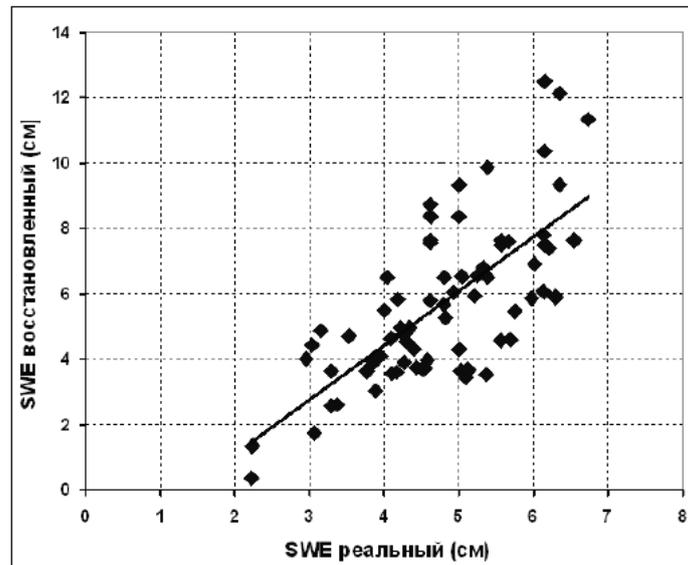


Рис. 2. Сравнение реальных и восстановленных значений SWE2 за зимний сезон 2011–2012 гг. для южных районов Омской области [3]

Измерение толщины снежных покровов методом комплексной дальнометрии

Снег обладает хорошей проницаемостью для радиоволн ВЧ- и СВЧ-диапазона. Проведенные исследования [5] выявили принципиальную возможность радиолокационного измерения толщины снежного покрова с борта летательного аппарата методом импульсной дальнометрии. Как показали результаты измерений, отраженные от снежного покрова радиолокационные сигналы демонстрируют смещение своего времени запаздывания, достигающего значения в 220 % от длительности зондирующего сигнала, что в значительной степени снижает точность измерения толщины снега. Возникновение такого временного смещения связано с формированием рассеянного сигнала не от верхней кромки, а непосредственно в толще снежного покрова в присутствии выраженных неоднородных слоев.

В то же время лазерное излучение, направленное в снег, хорошо отражается от его поверхности, при этом изменение плотности снежного покрова от свежеснежавшего до слежавшегося не приводит к значительным изменениям характеристик оптического отражения [9]. Отличия при проникновении в снег электромагнитных длин волн оптического и радиолокационного диапазонов могут быть использованы для комплексного измерения характеристик снега.

Рассмотрим применение метода комплексной дальнометрии (КД) для измерения толщины снежного покрова. На рис. 3 приведена схема одновременного облучения снега радиолокационными и оптическими сигналами (с несущими частотами f_1 и f_2), распространяющимися по нормали к земной поверхности. Принимая во внимание одинаковую скорость распространения излученных сигналов в воздушной среде, задержка при распространении радиолокационного сигнала относительно оптического сигнала будет связана с геометрической разностью хода лучей: $2 \cdot h / \sqrt{\varepsilon}$ (ε – диэлектрическая проницаемость снега), возникающей при отражении сигналов от верхней и нижней границ снежного покрова. В свою очередь, измерение τ может быть выполнено импульсным, частотным или фазовым способом.

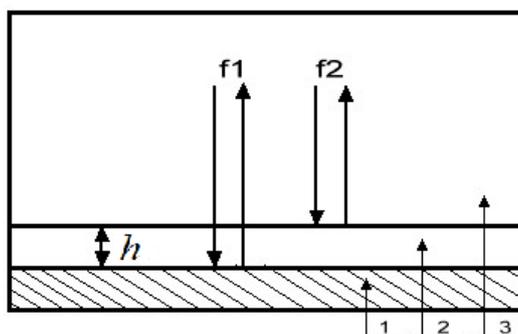


Рис. 3. Схема дистанционного измерения толщины снега:

1 – почва, лед; 2 – снежный покров; 3 – воздушная среда

Примечание: составлено автором.

В случае реализации метода КД с импульсной модуляцией сигналов в направлении земной поверхности синхронно излучаются оптические и радиолокационные импульсные сигналы и выполняются прямые измерения временных задержек τ_o (оптическая) и τ_p (радиолокационная) рассеянных сигналов с последующим формированием оценки толщины снега:

$$h = c \cdot (\tau_o - \tau_p) / (2 \cdot \sqrt{\varepsilon}), \quad (7)$$

где c – скорость света.

Влагозапас снега также можно определить по результатам измерения временных задержек:

$$\text{SWE} = \rho \cdot h = \rho \cdot c \cdot (\tau_o - \tau_p) / (2 \cdot \sqrt{\varepsilon}). \quad (8)$$

Оценка h и SWE, согласно (7) и (8), предполагает использование известных значений ε и ρ , которые могут быть получены по результатам забора образца снега и измерения его плотности, водности и электропроводности. Точность оценки толщины снежного покрова будет прямо связана с погрешностью измерения временных задержек τ_o и τ_p :

$$\delta h = \frac{c}{2 \cdot \sqrt{\varepsilon}} \cdot \sqrt{\delta \tau_o^2 + \delta \tau_p^2}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что приемлемую точность оценки толщины снега смогут обеспечить импульсные устройства – георадары, формирующие мощные короткоимпульсные сигналы при зондировании слоистых сред (почвогрунт, вода, лед) [10]. Точность измерения временной задержки отраженного сигнала георадаром «ОКО» будет определяться длительностью излучаемого сигнала, которая составляет 0,73 нс в диапазоне частот 700 МГц и 0,51 нс в диапазоне частот 1 000 МГц. Обеспечить малую погрешность измерения временных параметров отраженного сигнала $\delta \tau_o$ способны лидары типа ALTM, формирующие мощные оптические импульсы длительностью 3,4...15 нс при профилировании земной поверхности с борта летательного аппарата [11].

В высокоточной дальнометрии с целью достижения малых погрешностей измерений расстояния широко используется фазовый способ. Согласно [12] дистанционное определение толщины снежного покрова h методом КД с фазовой модуляцией сигналов основано на облучении снега амплитудно-модулированными радиолокационными и оптическими сигналами.

Уравнение фазовой комплексной дальнометрии имеет вид:

$$h = \frac{\Delta\varphi \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot F \cdot \sqrt{\varepsilon}} = \frac{(\varphi_o - \varphi_p) \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot F \cdot \sqrt{\varepsilon}}, \quad (10)$$

где F – частота амплитудной модуляции; $\Delta\varphi$ – разность фаз огибающего радиолокационного (φ_o) и оптического (φ_p) рассеянного сигнала в точке приема.

Если фазометрическая ошибка составляет величину $\delta\varphi$, тогда толщина снежного покрова будет определяться с погрешностью:

$$\delta h = \frac{\delta\varphi \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot F \cdot \sqrt{\varepsilon}}. \quad (11)$$

Как следует из (11), необходимую точность измерения толщины снега можно получить при больших значениях частоты модуляции F . При использовании цифровых фазометров точность измерения фазы составляет $\delta\varphi \leq 1^\circ$. В случае, когда диапазон значений формируемых согласно (10) оценок толщины снежного покрова оказывается меньше заданного, необходимо использовать режим модуляции с различными значениями F , что позволяет сохранить высокую точность измерений и обеспечить требуемый диапазон значений формируемых оценок h [9]. Лазерные дальнометры, работающие на длине волны 635 нм, используют амплитудную модуляцию светового пучка синусоидальным сигналом частотой до 150 МГц и имеют погрешность измерения дальности 1,5...2 мм [9]. Аналогичные параметры модуляции могут быть выбраны для передатчика радиолокационных сигналов в дециметровом или сантиметровом диапазоне длин волн.

При измерении толщины снега методом КД может применяться и частотный способ, согласно которому радиолокационный передатчик в режиме излучения формирует непрерывные частотно-модулированные сигналы, а приемник настроен на разностную частоту излученного и отраженного сигналов. Толщина снежного покрова будет связана с разностной частотой f_p согласно формуле:

$$h = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left(D_o - \frac{c \cdot f_p}{4 \cdot F \cdot \Delta F} \right), \quad (12)$$

где F – частота модуляции; ΔF – девиация частоты; D_o – оптическая дальность до верхней кромки снега. Формирование частотно-модулированных сигналов в оптическом диапазоне длин волн является трудноразрешимой задачей, поэтому дальность D_o в (12) необходимо измерять, используя импульсный или фазовый способ. Заметим, что метод КД при измерении времени задержки τ разрешает использовать любое технически реализуемое сочетание способов измерения дальности (импульсный, фазовый, частотный) в оптическом и радиолокационном диапазоне.

Точность измерения толщины снежного покрова методом КД с частотной модуляцией радиолокационных сигналов равна

$$\delta h = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \sqrt{\delta D_o^2 + \frac{c^2}{16 \cdot \Delta F^2}}. \quad (13)$$

В качестве радара с частотной модуляцией излученных сигналов, пригодного для измерения толщины снега, могут быть использованы самолетные радиовысотометры А-037, РВ-5, РВ-85, в которых девиация частоты частотно-модулированного сигнала составляет 120...200 МГц [13].

Проведем сравнительный анализ точности измерения толщины свежевыпавшего снега ($\varepsilon = 1,2$) методом КД с импульсной, фазовой и частотной модуляцией зондирующих сигналов. В табл. 1 приведены результаты расчета погрешностей измерения величин оптической дальности D_o , радиолокационной дальности D_p и толщины снежного покрова h , выполненные согласно (9), (11), (13).

Таблица 1

Сравнительный анализ способов модуляции зондирующих сигналов

Погрешность измерения	δD_o , мм	δD_p , мм	δh , мм
Импульсная модуляция, $\delta\tau_p = 0,51нс$, $\delta\tau_o = 3,4нс$	466	70	471
Фазовая модуляция, $F = 150МГц$, $\delta\varphi = 1^\circ$	2,6	2,6	2,6
Частотная модуляция, $\Delta F = 200МГц$	-	375	-

Примечание: составлено автором.

Данные расчета свидетельствуют о том, что наибольшую точность измерения толщины снега обеспечивает метод КД с фазовой модуляцией сигналов при условии, что воздушный носитель, реализующий дистанционное измерение, не меняет своего положения на интервале измерения (данное требование реализуемо с БПЛА). В противном случае погрешность измерения может увеличиться.

Экспериментальное исследование снежной поверхности реки

На рис. 4 приведены результаты эксперимента, полученные в зимний период с борта вертолета при зондировании георадаром «ОКО-2» заснеженной поверхности участка реки Томи. Квадратные рупоры, размещенные в раскрыв излучающей и приемной антенны блока АБ-700, формировали ширину диаграммы направленности антенн $15^\circ \times 15^\circ$, благодаря чему облучаемая георадаром площадка заснеженной поверхности не превышала 3 м. По результатам георадарного обследования были выявлены отраженные сигналы от верхней и нижней кромки льда и дна реки. Толщина льда составила в среднем 40 см, а дно водоемов уверенно фиксировалось до глубин 6–7 м.

Оптические измерения выполнялись с помощью дальномера GLM 100, который позволил измерить оптическую дальность D_o (с погрешностью в $\delta D_o = 2$ мм) при отражении сигналов от верхней кромки снега при одновременном радиолокационном облучении заснеженной поверхности. Оценка толщины снежного покрова формировалась как разность полученных показаний дальномера D_o и расстояния, пропорционального времени τ_p , в течение которого был сформирован радиолокационный сигнал, отраженный верхней кромкой льда:

$$h = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left(D_o - \frac{c \cdot \tau_p}{2} \right). \quad (14)$$

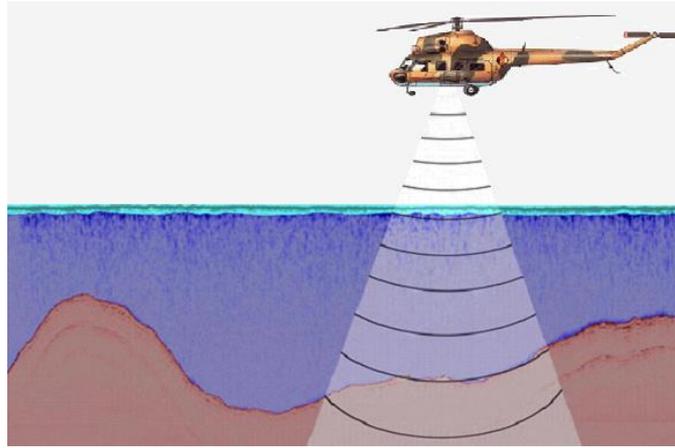


Рис. 4. Результаты георадарного обследования участка реки Томи
Примечание: рисунок автора.

На рис. 5 приведена радарограмма рассеянных радиолокационных сигналов с выделенными границами: ВК (верхняя кромка снега), НК (нижняя кромка снега), НЛ (низ льда). Данные забора снега позволили установить плотность снега со значением $0,27 \text{ г/см}^3$, а диэлектрическая проницаемость снега оказалась равной 1,31. Толщина снежного покрова, заключенного между ВК и НК (рис. 5), вычислялась с использованием (14) и составила 36 см; толщина льда, заключенного между НК и НЛ, составила 42 см. Результаты летного обследования других участков реки показали, что толщина снежного покрова изменяется в пределах 30...48 см. Погрешность измерения временной задержки оптического сигнала от кромки снега составила $\delta\tau_o = 0,13 \text{ нс}$, погрешность измерения времени отражения от кромки снега радиолокационного сигнала – $\delta\tau_p = 0,73 \text{ нс}$, погрешность оценки толщины снежного покрова, определяемая согласно (9), составила 9,4 см. Оценка влагозапаса снега исследуемого участка реки, выполненная согласно (1) для среднего значения толщины снега 35 см, показала значение $SWE = 9,5 \pm 1,2 \text{ см}$.

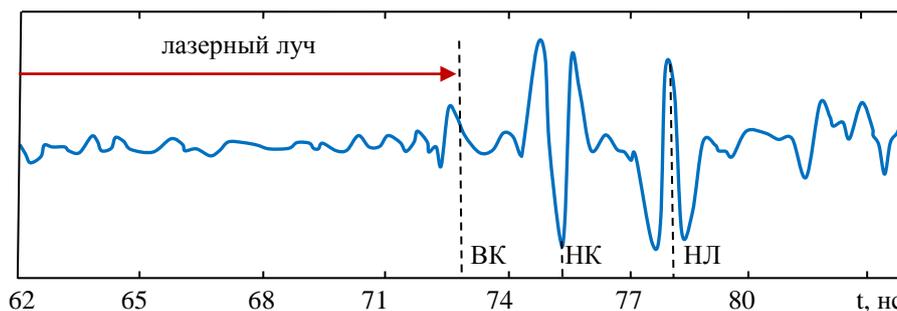


Рис. 5. Радарограмма рассеянных сигналов при радиолокационном зондировании поверхности реки с борта вертолета
Примечание: составлено автором.

Платформа БПЛА для комплексного обследования земной поверхности

Развитие БПЛА и технических средств визуализации местных предметов в различных спектральных диапазонах позволяет решать на качественно новом уровне задачи комплексного исследования характеристик различных объектов. Рассмотрим применение БПЛА в задаче дистанционного исследования земной поверхности в зимних условиях. Реализуемые БПЛА функции в данном случае включают:

- картографирование заданного района с высокой степенью детализации местных предметов;
- передачу данных измерений заказчику в реальном масштабе времени;

- управление маршрутом движения;
- измерение характеристик снежного и ледового покрова.

Построение детализированной карты местности требует применения методов активной лазерной локации. Наиболее перспективной в настоящее время является технология LiDAR (Light Detection and Ranging), которая использует пульсирующий лазерный луч при сканировании местности. Скорость лазерного сканирования составляет 1 500 000 измерений/сек, а результатом является построение 3D-модели ландшафта (рис. 6), с которой может работать заказчик. При подключении к процедуре исследования БПЛА скорость лазерного сканирования местности достигнет 4 000 м²/мин. В зависимости от условий сканирования LiDAR использует излучение в ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазоне с точностью измерения неровностей рельефа местности 10–30 мм.

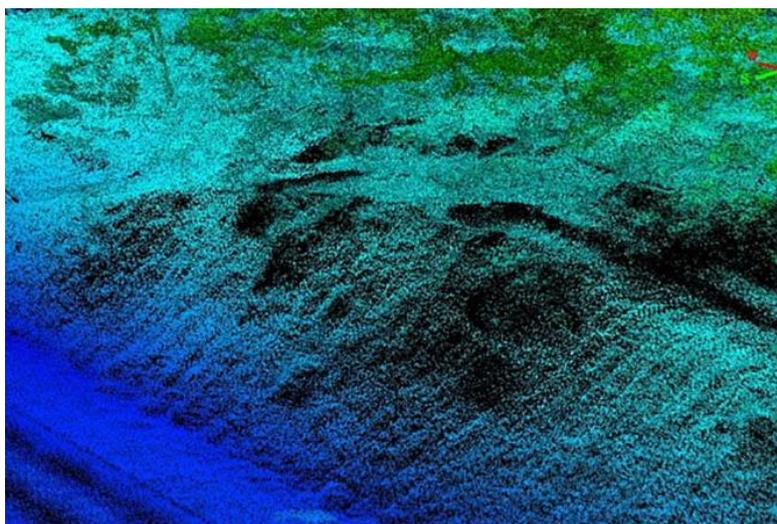


Рис. 6. Пример 3D-картографирования окружающего ландшафта с помощью технологии LiDAR [14]

Измерение характеристик снежного и ледового покрова при движении БПЛА требует наличия в его составе радара, формирующего зондирующие сигналы в дециметровом или сантиметровом диапазоне длин волн. Использование георадара в составе БПЛА, наряду с измерением толщины снежного и ледового покрова, позволяет расширить круг решаемых задач при обследовании характеристик подстилающей поверхности и залегающих инженерных сетей подземной коммуникации. Оценка толщины снежного покрова выполняется методом комплексной дальнометрии, оценка толщины льда – методом импульсной радиолокационной дальнометрии.

Выбор платформы БПЛА должен учитывать возможность размещения лазерной сканирующей системы и георадара, а также требования дальности движения, надежности, допустимых ветровых нагрузок и эксплуатации в зимний период. Перечисленным требованиям удовлетворяют беспилотные летающие платформы Matrice 600, которые относятся к категории промышленных полетных платформ, обладают высокой устойчивостью к пыли и воде и способны работать в зимних условиях при скорости ветра, не превышающей 5 м/с. Для успешного выполнения полетной миссии Matrice 600 использует мощную силовую установку и технические средства управления дроном и стабилизации его поведения. На Matrice 600 для этого установлен полетный контроллер A3, а для передачи данных и видеосигнала в режиме онлайн используется система Lightbridge 2, обладающая дальностью действия до 5 км. Средства управления электропитанием и комплект из шести интеллектуальных полетных батарей обеспечивают гексакоптерам Matrice 600 стабильный и длительный по времени полет. На рис. 7 приведена конструкция Matrice 600, включающая в себя лазерную систему сканирования ScanLook LiDAR (1) и георадар «ОКО» (2), закрепленный с помощью подвеса.



Рис. 7. Платформа Matrice 600 для проведения обследования
Примечание: рисунок автора.

Заключение

При обследовании снежных покровов земли методом спутниковой радиометрии алгоритмы выделения территорий залегания снега с использованием индекса NDSI находятся в критической зависимости от состояния облачности. При этом оценка влагозапаса снежных покровов требует статистического усреднения значительного числа восстановленных значений SWE, точность измерения SWE составляет 18...32 %, а известные алгоритмы расчета SWE1–SWE4 нуждаются в проверке при их применении в изучаемых регионах. Метод комплексной дальнометрии позволяет дистанционно измерить характеристики снежного покрова с использованием импульсной, фазовой и частотной модуляции оптических и радиолокационных сигналов. Погрешность измерения толщины снежного покрова методом фазовой комплексной дальнометрии составляет 2,6 мм. Результаты экспериментальных исследований характеристик снежного покрова участка реки показывают эффективность применения метода комплексной дальнометрии, реализуемого с помощью средств радиолокационного и лазерного зондирования с борта вертолета. Размещение лазерной сканирующей системы и георадара в составе средств беспилотного летательного аппарата представляет собой перспективную конструкцию устройства комплексного обследования земной поверхности в зимних условиях, при этом результаты выделения участков залегания снега и точность измерения толщины снежных и ледовых покровов не зависят от состояния облачности на исследуемых территориях.

Литература

1. Grody N. C. Classification of Snow Cover and Precipitation using the Special Sensor Microwave/Imager (SSM/I) // J Of Geophys Res. 1991. No. 96. P. 7423–7435.
2. Березин К. Ю., Дмитриев А. В., Дмитриев В. В. Оценка влагозапаса снежного покрова по данным спутниковой радиометрии для степной зоны Западной Сибири // Вестн. СибГАУ. 2013. № 5. С. 9–12.
3. Березин К. Ю., Дмитриев А. В., Дмитриев В. В. Исследование статистической зависимости алгоритмов восстановления запасов снега // Современ. проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2014. Т. 3, № 11. С. 301–309.
4. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. М. : А и Б, 1997. 296 с.
5. Финкельштейн М. И., Карпухин В. И., Кутев В. А., Метелкин В. Н. Подповерхностная радиолокация. М. : Радио и связь, 1994. 216 с.

6. Riggs G., Hall D., Salomonson V. A Snow Index for the Landsat Thematic Mapper and Moderate Resolution Imaging Spectrometer // *Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis, and Interpretation : Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS '94*. 1994. Vol. 4. P. 1942–1944.
7. Дмитриев А. В., Дмитриев В. В. Аппроксимационный алгоритм картирования снежного покрова по спутниковым данным // *Актуал. вопросы современ. науки*. 2014. № 36. С. 40–51.
8. Лагутин А. А., Никулин Ю. А., Шмаков И. А. и др. Восстановление характеристик подстилающей поверхности Сибирского региона по данным спектрорадиометра MODIS // *Вычислит. технологии*. 2006. Т. 11, Ч. 1. С. 61–71.
9. Аснис Л. А., Васильев В. П., Волконский В. Б. и др. Лазерная дальнометрия / под ред. В. П. Васильева и Х. В. Хинрикус. М. : Радио и связь, 1995. 256 с.
10. Вопросы подповерхностной радиолокации : коллектив. моногр. / под ред. А. Ю. Гринева. М. : Радиотехника, 2005. 416 с.
11. Волков В. Г. Мобильные лазерные приборы для спецтехники // *Спец. техника*. 2011. № 22. С. 2.
12. Шошин Е. Л., Суханюк А. М. Комплексный измеритель толщины снежного покрова : сб. науч. тр. Вып. 19. Физ.-мат. и технич. науки. Сургут : Изд-во СурГУ, 2004. С. 141–147.
13. ГОСТ Р 50860-2009. Самолеты и вертолеты. Устройства антенно-фидерные радиосвязи, навигации, посадки и управления воздушным движением. Общие технические требования, параметры, методы измерений. М. : Стандартинформ, 2009. 65 с.
14. Как технология LiDAR совершила переворот в картографии и сборе геопрограмственных данных. URL: <https://4vision.ru/articles/kak-tehnologiya-lidar-sovershila-perevorot-v-kartografii-i-sbore-geoprostranstvennyh-dannyh.html> (дата обращения: 27.01.2021).