

Методика измерения радиотеплового излучения криосферных образований с борта БПЛА

А.А. Гурулев¹, Г.С. Бордонский¹, В.А. Казанцев¹, А.К. Козлов¹

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
672002, г. Чита, ул. Недорезова, 16а, а/я 1032.
E-mail: lgc255@mail.ru

Ввиду особенностей электромагнитных свойств воды и льда в микроволновом диапазоне эффективным методом изучения их структурных особенностей являются активные и пассивные радиолокационные методы. В работе выполнены радиометрические измерения криосферных объектов, установленным на борт БПЛА радиометром на длину волны 0,88 см. Показана необходимость учета изменения углов положения БПЛА в пространстве и рассмотрены особенности интерпретации радиотеплового излучения тонких плоскостных сред.

Ключевые слова: микроволновая радиометрия, криосферные образования, БПЛА, калибровка радиометров.

Methodology for measuring radiothermal radiation of cryospheric formations from aboard a UAV

A.A. Gurulev¹, G.S. Bordonsky¹, V.A. Kazantsev¹, A.K. Kozlov¹

¹ Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS
672002, Chita, Nedorezova st., 16a, P.O. Box 1032.
E-mail: lgc255@mail.ru

Due to the peculiarities of electromagnetic properties of water and ice in the microwave range, active and passive radar methods are an effective method for studying their structural features. In this work, radiometric measurements of cryospheric objects were performed using a radiometer installed on board a UAV at a wavelength of 0.88 cm. The need to take into account changes in the angles of the UAV position in space and to interpret the radiothermal radiation of thin plane-layered media is shown.

Keywords: microwave radiometry, cryospheric formations, UAVs, calibration of radiometers.

Введение

Современное развитие технологий способствовало широкому использованию беспилотных летательных средств, на борт которых устанавливается разнообразная измерительная аппаратура. С использованием метеорологического оборудования и устройств дистанционного зондирования, расположенного на БПЛА, выполняют исследования параметров нижних слоев атмосферы [1]; производится мониторинг земной поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах для решения широкого круга задач народного хозяйства [2-3]. С развитием техники БПЛА появилась возможность увеличивать массу полезной нагрузки на борту летательного аппарата. За счет этого существенно улучшается технология приземного дистанционного зондирования земных покровов. На борт БПЛА устанавливаются не только оптические камеры, но и микроволновые радиометры, георадары и комплексы аппаратуры, которые позволяют проводить диагностику различных сред с больших глубин. Например, при

определении влажности почвы с использованием микроволнового радиометра удалось определить протечку дамб [4]. С использованием георадаров, установленных на БПЛА [5], появилась возможность оперативно исследовать более глубокие процессы, происходящие внутри грунтов (исследование подземных вод, подземных коммуникаций и т.п.). Представляет интерес и использование миллиметровых волн для достижения высокой пространственной разрешающей способности.

При исследовании криосферных образований в микроволновом диапазоне за счет существенных отличий диэлектрических свойств воды и льда появляется возможность регистрировать характеристики льда, содержащего различного вида включения и примеси [6]. Не все природные объекты являются легкодоступными, некоторые таят в себе опасность, например тонкий лед. Для этих случаев БПЛА с установленным на нем радиометром является незаменимым. По этой причине использование микроволновых радиометров, установленных на БПЛА, особенно с целью мониторинга криосферных образований имеет особую перспективу. Вместе с тем, имеется ряд нерешенных вопросов в методике исследования ледяных тел в микроволновом диапазоне с использованием БПЛА. К таким вопросам можно отнести: 1) калибровку радиометров; 2) изменение углов БПЛА в пространстве, что влечет к изменению мощности регистрируемого радиотеплового излучения, которое зависит от угла наблюдения; 3) особенности излучения плоскостных сред с тонким промежуточным слоем и малыми диэлектрическими потерями. Последнее приводит к вариациям радиояркостной температуры за счет явления интерференции, что необходимо учитывать при интерпретации получаемых данных для систем с высоким пространственным разрешением. Целью данной работы является оценка возникающих особенностей изменения радиояркостной температуры криогенных сред на миллиметровых волнах при проведении радиометрических измерений с борта БПЛА.

Методика эксперимента

Для отработки методики измерений радиотеплового излучения в миллиметровом диапазоне нами был изготовлен радиометрический приемник на частоту 34 ГГц с шириной полосы пропускания 2,3 ГГц с флуктуационной чувствительностью 0,05 К при постоянной времени 1 с. В качестве антенны использовался гофрированный рупор, имеющий малый уровень боковых лепестков. Данный радиометр подвешивался на трос с целью отработки методики радиометрических измерений с использованием БПЛА, а также устанавливался на беспилотный летательный аппарат с грузоподъемностью до 4 кг. Фотографии измерительной аппаратуры показаны на рис. 1. Калибровку радиометра осуществляли по эталонам черного тела, имеющих температуру окружающей среды и температуру кипения жидкого азота. Также для калибровки были использованы измерения отраженного радиотеплового излучения неба, не имеющего облачных образований (в Забайкальском крае в зимний период времени атмосфера выморожена и содержит малое количество водяного пара и водного аэрозоля). Измерения осуществлялись под углом наблюдения 12° на вертикальной поляризации. Запись выходного сигнала и внутренней температуры радиометра осуществлялась на систему записи, установленную в приборе.

Измерения осуществлялись над поверхностью ручья, который был покрыт ледяным покровом различной толщины со средним значением 10 см; местами наблюдалась открытая вода. Измерения выполняли также над заснеженным участком грунта и бетонным покрытием. Толщина снежного покрова 5–15 см.

Исследования криосферных образований осуществляли при безоблачной атмосфере с целью исключения влияния облаков на мощность радиотеплового излучения.



а)

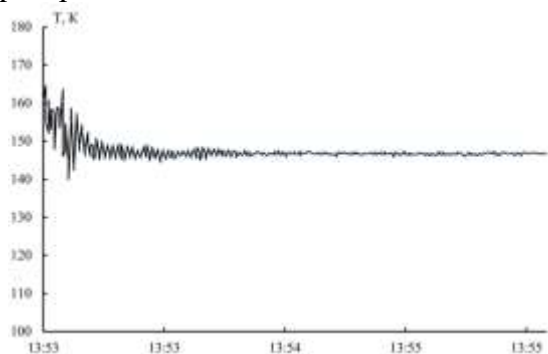


б)

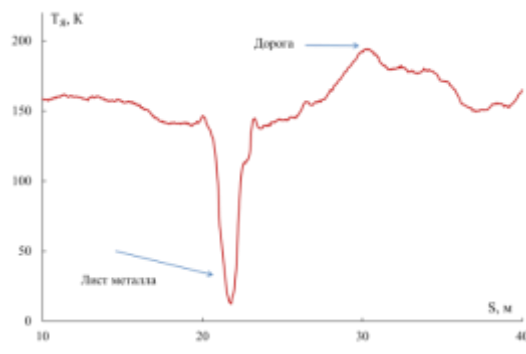
Рис. 1. Фотографии процесса измерения собственного теплового излучения на длине волны 0,88 см а) речного стока, б) мерзлого грунта со снежным покровом

Полученные результаты и их обсуждение

Установлено, что над открытой водной поверхностью изменение угла наблюдения на 5° от исходного значения приводит к вариациям радиояркостной температуры до 10 К, рис. 2а. Изменение угла было связано с порывом ветра, в результате чего радиометр, подвешенный на тросе отклонился от положения равновесия и в течение одной минуты совершал затухающие колебательные движения. При установлении БПЛА с радиометром над одной точкой заснеженной поверхности, также за счет ветрового воздействия на радиометр исследовали изменение углов положения радиометров в пространстве.



а)



б)

Рис. 2. Радиояркостная температура на длине волны а) водной поверхности при колебании радиометра под действием ветра в зависимости от времени, б) грунта покрытого снегом в зависимости от расстояния

Таким образом, при радиометрических измерениях открытой водной поверхности с использованием БПЛА необходимо производить непрерывную регистрацию углов положения радиометра в пространстве не хуже $0,5^\circ$.

При пролете БПЛА над заснеженной поверхностью нами была зарегистрирована бетонная дорога, которая за счет различий излучательных свойств грунта и бетона была определена по повышению значения радиояркостной температуры. Данный результат

представлен на рис. 2 б. При пролете над металлическим листом фиксировалось уменьшение значения мощности радиотеплового излучения.

При исследовании толщины растущего пресного ледяного покрова, имеющего минерализацию 30 мг/кг, для разных углов зондирования были получены расчетные данные, приведенные на рис. 3 а. Расчет радиояркостной температуры осуществлялся для плоскостной неизолированной среды по формулам, приведенным в работе [7]. Температура льда принималась равной -3°C . На представленном рисунке приведены данные для вертикальной поляризации радиотеплового излучения.

На рис. 3 б приведена разность значений радиояркостной температуры ледяного покрова лежащего на водной поверхности между углами наблюдения 20° и 10° . Как видно из приведенного графика данная разность увеличивается при используемых параметрах ледяного покрова и достигает максимальных значений $\sim 30\text{ K}$.

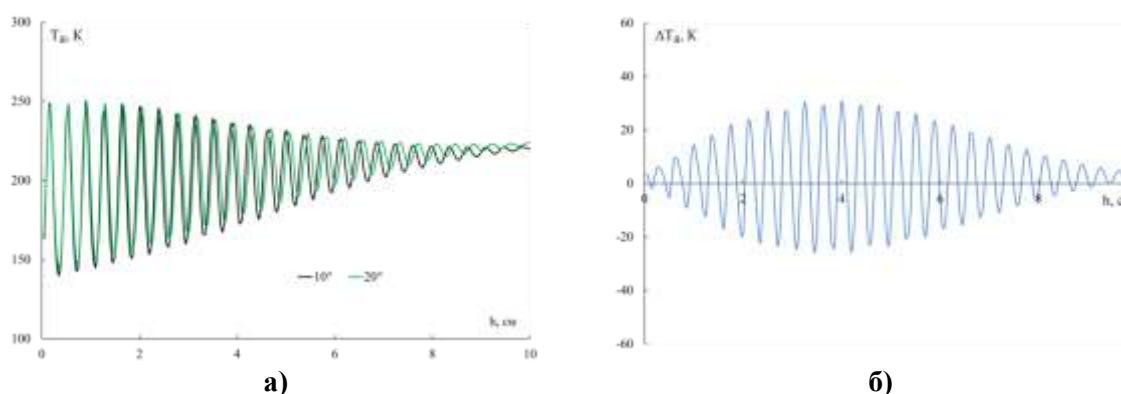


Рис. 3. а) зависимость радиояркостной температуры ледяного покрова от толщины на вертикальной поляризации при углах наблюдений 10° и 20° на длине волны 0,88 см. б) разность значений радиояркостных температур между 20° и 10° углов наблюдения.

Из выполненных расчетов следует, что наблюдаются осцилляции радиояркостной температуры растущего ледяного покрова в зависимости от его толщины. Кроме того, они зависят от угла наблюдения. Также данные вариации наблюдаются и для горизонтальной поляризации. При натурных измерениях растущего ледяного покрова показано, что они существенно зависят от угла наблюдения [8]. Приращение радиояркостной температуры из-за изменения угла наблюдения на 10° отсутствует вблизи нулевой толщины льда и возрастают до значения $\sim 30\text{ K}$ при толщине 4 см при данной минерализации льда. Этот эффект исчезает при поднятии радиометра на высоту, при которой, в случае практических измерений, происходит усреднение сигнала с увеличенной площади ледяного покрова. То же при возрастании толщины льда выше 15-20 см. С уменьшением количества солевых примесей в ледяном покрове вариации наблюдаются при больших значениях толщины льда. Данный факт связан с уменьшением значения мнимой части относительной комплексной диэлектрической проницаемости исследуемой среды.

Таким образом, при исследовании относительно тонких плоскостных сред с малыми потерями (снежный и ледяной покровы с толщинами в единицы и десятки сантиметров и т.п.) с использованием микроволновых радиометров миллиметрового диапазона, установленных на БПЛА, при наблюдениях с небольших высот необходимо учитывать явление интерференции, наблюдаемой в данных средах. Для уменьшения вариаций радиояркостной температуры необходимо использовать широкополосные радиометры. Данная задача имеет практическое значение, например, при дистанционном мониторинге ледовых переправ.

Выводы

Таким образом, выполненное исследование по радиометрическим измерениям в миллиметровом диапазоне криосферных образований с использованием БПЛА показало:

1. При радиометрических измерениях необходимо учитывать угол наблюдения и вести постоянно его регистрацию, особенно для случая открытой водной поверхности и измерениях с малых высот. Требуется пространственная стабилизация положения антенны с точностью не хуже 0,5 градуса, либо коррекция измеряемого сигнала по углу отклонения оси антенны от заданного направления.

2. При углах наблюдения меньше 20°, широкой полосе радиометров (больше 2 ГГц) и усреднения по площади $>20 \text{ м}^2$ ошибки в колебаниях радиояркостной температуры невелики для вариаций угла наблюдения $\sim 1^\circ$.

3. Радиометрические измерения криосферных образований в миллиметровом диапазоне, с использованием высокочувствительных микроволновых радиометров, установленных на борт БПЛА, являются уникальным средством для диагностики их состояний, особенно в труднодоступных местах.

4. Для исследования плоскостойких сред с малыми диэлектрическими потерями при высокой пространственной разрешающей способности в миллиметровом диапазоне необходимо учитывать существующие вариации радиояркостной температуры от их толщины за счет явления интерференции в слоистой среде.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-27-00278.

Литература

1. Репина И.А., Варенцов М.И., Чечин Д.Г., Артамонов А.Ю., Бодунков Н.Е., Калягин М.Ю., Живоглотов Д.Н., Шевченко А.М., Варенцов А.И., Куксова Н.Е., Степаненко В.М., Шестакова А.А. Использование беспилотных летательных аппаратов для исследования атмосферного пограничного слоя // Инноватика и экспертиза: научные труды. 2020. № 2 (30). С. 20-39.
2. Жук В.Р., Козлов И.Е., Кубряков А.А., Соловьев Д.М., Осадчиев А.А., Степанова Н.Б. Применение БПЛА-измерений для оценки динамики прикромочной ледовой зоны в Карском море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 235-245.
3. Романец И.И., Мудриченко Н.М. Новые цифровые решения: использование дронов в сельском хозяйстве // Экономика и предпринимательство. 2024. № 5 (166). С. 582-586.
4. Сидоров И.А., Гудков А.Г., Шашурин В.Д., Чижилов С.В., Новичихин Е.П., Хохлов Н.Ф., Порохов И.О., Пчелинцев В.Э., Агандеев Р.В. Дистанционное определение влажностного портрета дамбы СВЧ-радиометром с борта беспилотного летательного аппарата // Нанотехнологии: разработка, применение - XXI век. 2022. Т. 14. № 3. С. 5-13.
5. Новый подход к использованию системы георадар-дрон: [Электронный ресурс]. // Компания «Совзонд». URL: <https://sovzond.ru/press-center/news/corporate/4527/>. (Дата обращения: 31.03.2025).
6. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Особенности радиотеплового излучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 2. С. 210-215.
7. Клепиков И.Н., Шарков Е.А. Теоретические исследования собственного излучения резконеоднородных неизотермических сред // Исслед. Земли из космоса. 1992. № 6. С. 3-15.
8. Гурулев А.А., Орлов А.О., Цыренжапов С.В. Тепловое излучение трехслойной среды с тонким промежуточным слоем // Исследование Земли из космоса. 2011. № 4. С. 5-11.