

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 504.064.38

**СПЕКТРОРАДИОМЕТР 5-МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ
И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

© 2020 г. А. А. Швецов^{а,*}, М. В. Беликович^а, А. А. Красильников^а, М. Ю. Куликов^а,
Л. М. Кукин^а, В. Г. Рыскин^а, О. С. Большаков^а, И. В. Леснов^а, А. М. Щитов^б,
А. М. Фейгин^а, В. Б. Хайкин^с, И. В. Петров^{д,е}

^а Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

^б НФ АО «НПФ ТЕХНОЯКС»

Россия, 603152, Нижний Новгород, ул. Кащенко, 6

^с Санкт-Петербургский филиал Специальной астрофизической обсерватории РАН
Россия, 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе, 65, к. 2

^д АО «НИИ полупроводниковых приборов»,
Россия, 634034, Томск, ул. Красноармейская, 99а

^е Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36

*e-mail: shvetsov@ipfran.ru

Поступила в редакцию 12.12.2019 г.

После доработки 07.04.2020 г.

Принята к публикации 30.04.2020 г.

Представлены результаты разработки мобильного твердотельного микроволнового спектрорадиометра, работающего в 5-миллиметровой полосе поглощения молекулярного кислорода. Спектрорадиометр состоит из супергетеродинного приемника с малошумящим усилителем на входе и 8-канального анализатора спектра. Шумовая температура прибора 1000–1300 К. Для обеспечения автоматической внутренней калибровки интенсивности принимаемого радиоизлучения используется твердотельной модулятор-калибратор на основе GaAs-диодов с барьером Шоттки. Конструкция антенной системы спектрорадиометра представляет собой тефлоновую просветленную линзу с коническим гофрированным облучателем. Прибор оснащен автоматизированной цифровой системой управления процессом измерения, калибровки и предварительной обработки данных. Приводятся примеры результатов измерений спектров излучения атмосферы и излучательных характеристик земной поверхности, полученных с помощью прибора. Спектрорадиометр предназначен для дистанционных исследований атмосферы и подстилающей поверхности.

DOI: 10.31857/S0032816220050377

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционные методы являются одними из важнейших инструментов исследования окружающей среды, они позволяют получать ценную информацию об атмосферных процессах, характеристиках поверхности суши и океана. Развитию методов дистанционного зондирования способствует использование различных диапазонов электромагнитных излучений как активных, так и пассивных. В частности, микроволновый диапазон широко используется для восстановления профиля температуры и влажности атмосферы, температуры и уровня волнения морской поверхности и т.п.

Особое место в этих исследованиях занимает диапазон миллиметровых волн. Это связано с тем, что в нем находятся линии и полосы излучения молекул газов, составляющих земную атмосферу, таких как молекулярный кислород и водяной пар, а также малых газовых составляющих, таких как озон, окись углерода, окислы азота и др.

Излучение атмосферы в линиях и полосах газов в этом диапазоне используется для дистанционного мониторинга температуры, влажности и содержания малых газовых составляющих [1, 2]. В то же время для зондирования земной поверхности, как правило, применяются радиометры, работающие в диапазонах микроволн с малым атмосферным поглощением — в так называемых

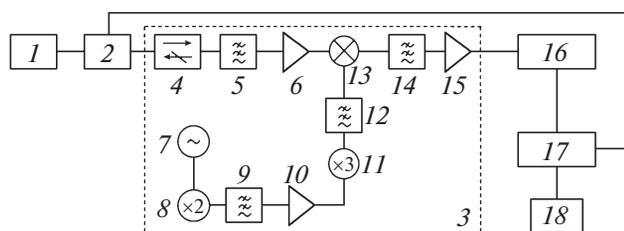


Рис. 1. Структурная схема спектрометра. 1 – антенная система; 2 – модулятор-калибратор; 3 – приемник радиоизлучения миллиметрового диапазона; 4 – волновод; 5 – режекторный фильтр зеркального канала; 6 – усилитель высокой частоты; 7 – синтезатор; 8 – удвоитель частоты; 9, 12 – полосовые фильтры; 10 – усилитель; 11 – утроитель частоты; 13 – смеситель; 14 – фильтр низких частот; 15 – усилитель промежуточной частоты; 16 – анализатор спектра; 17 – цифровой модуль для предварительной обработки результатов измерений и управления процессом измерения; 18 – персональный компьютер.

“окна прозрачности”. Однако области спектра со значительным поглощением в атмосфере также могут использоваться для получения информации о подстилающей поверхности [3]. При этом нисходящее тепловое излучение атмосферы используется в качестве подсветки поверхности.

Как показано в работе [4], сравнение спектров нисходящего атмосферного излучения в областях с сильной частотной зависимостью поглощения (на склонах линий и полос атмосферных газов) со спектрами излучения земной поверхности может дать уникальную информацию о физических свойствах покрова и его тепловом режиме. В частности, зондирование поверхности в диапазоне длин волн, лежащих на склонах 5-мм полосы или 2.5-мм линии молекулярного кислорода, позволяет получать информацию одновременно о физической температуре и о коэффициенте излучения верхнего слоя покрова [4].

Идея метода заключается в следующем. Яркостная температура поверхности T_y связана с яркостной температурой нисходящего излучения атмосферы T_a соотношением

$$T_y = (1 - A)T_{\text{пов}} + AT_a, \quad (1)$$

где $T_{\text{пов}}$ – физическая температура скин-слоя покрова, A – его альbedo (коэффициент отражения). Выполнив измерения T_y и T_a на ряде частот с различной интенсивностью нисходящего излучения, из полученной системы уравнений (1) можно определить как величину A , так и $T_{\text{пов}}$.

Условием применимости этого метода является постоянство альbedo для этих частот, что выполняется для большинства естественных земных покровов в относительно узких диапазонах частот на склонах полосы или линии O_2 . Для реализации метода в принципе достаточно измерений

на двух частотах. Однако увеличение числа частотных каналов дает повышение чувствительности и помехозащищенности измерений.

ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Для решения комплекса задач дистанционного зондирования атмосферы и поверхности с использованием спектральных особенностей миллиметрового диапазона в ИПФ РАН разработан мобильный автоматизированный спектрометр 5-мм диапазона длин волн.

Структурная схема спектрометра приведена на рис. 1. Спектрометр имеет 8 частотных каналов, расположенных на низкочастотном склоне 5-мм полосы поглощения молекулярного кислорода. Полная полоса приема 50–55 ГГц. Каналы расположены между узкими, разрешаемыми при наблюдении с поверхности Земли линиями O_2 , которые могут использоваться для дистанционного зондирования температуры стратосферы [2].

Антенная система 1 спектрометра представляет собой тefлоновую линзу, просветленную с помощью концентрических канавок [5] и облучаемую коническим гофрированным рупором-облучателем. Расчет облучателя проводился по методике, аналогичной описанной в работе [6]. Антенна обеспечивает осесимметричную диаграмму направленности шириной $\sim 2.5^\circ$ по половинному уровню мощности и уровень боковых лепестков менее -25 дБ. Суммарные потери в антенной системе составляют ~ 0.8 дБ.

Принимаемое антенной излучение поступает в волноводное устройство, реализующее функции модулятора и источника шумовых калибровочных сигналов, – модулятор-калибратор 2 [7, 8]. Модулятор-калибратор представляет собой отрезок волновода основного сечения 4.4×2.2 мм, в который вмонтирована монолитная интегральная микросхема, состоящая из ряда цепочек диодов с барьером Шоттки. При попеременной подаче на них одного из трех уровней постоянного тока смещения модулятор-калибратор переключает устройство в одно из трех состояний:

1) при нулевом токе модулятор-калибратор открыт, и измеряемый антенный сигнал поступает в приемник, потери в открытом состоянии в модуляторе-калибраторе составляют ~ 0.5 дБ;

2) при подаче управляющего тока антенный вход запирается и на вход приемника подается шумовой калибровочный сигнал, генерируемый модулятором-калибратором; при токе 2 мА уровень калибровочного шумового сигнала, поступающего на вход приемника, составляет ~ 160 К (холодная нагрузка);

3) при управляющем токе ~ 25 мА (теплая нагрузка) уровень достигает ~ 300 К.

Стабильность калибровочных сигналов обеспечивается использованием стабилизатора управляющего тока и термостатированием модулятора-калибратора. Коэффициенты передачи и шумовые параметры модулятора-калибратора определяются путем проведения процедуры первичной калибровки, описанной ниже.

Далее сигналы через развязывающий ферритовый вентиль 4 с прямыми потерями 0.6 дБ и развязкой не менее 20 дБ подаются в высококачественный малозумящий усилитель 6 с шумовой температурой ~ 540 К и коэффициентом передачи ~ 35 дБ. С помощью балансного диодного смесителя 13, работающего на первой гармонике сигнала гетеродина, спектр сигнала преобразуется в полосу промежуточных частот 2–7 ГГц. На входе смесителя установлен полосовой фильтр 5, ослабляющий прием по зеркальному каналу на величину ≥ 20 дБ.

Гетеродинный сигнал смесителя с частотой 48 ГГц в свою очередь формируется из сигнала синтезатора с частотой 8 ГГц и мощностью 50 мВт цепочкой из последовательно включенных с.в.ч.-устройств: удвоителя частоты 8, полосового фильтра 9 и усилителя, выполненных в едином корпусе, а также утроителя частоты и волноводного полосового фильтра 12 с центральной частотой 48 ГГц. На входе смесителя уровень мощности гетеродинного сигнала составляет не менее 10 мВт с подавлением побочных частот синтезатора не менее 50 дБн. Относительная нестабильность частоты гетеродина составляет $\leq 10^{-7}$.

Сигнал промежуточной частоты со смесителя поступает на усилитель 15, а затем – в анализатор спектра 16, представляющий собой банк из восьми полосовых фильтров с шириной полос от 150 до 500 МГц. Таким образом, на входе спектро радиометра в полосе 50–55 ГГц формируются 8 частотных каналов, расположенных на склоне 5-мм полосы поглощения O_2 .

Центральные частоты и ширины каналов оптимизированы исходя из условия, что величина допустимых систематических ошибок измерения спектра излучения атмосферы не должна превышать 0.1 К. Шумовая температура спектро радиометра, приведенная к апертуре антенны, варьируется по каналам от 1000 до 1300 К, что обеспечивает флуктуационную чувствительность с учетом калибровочной процедуры 0.1–0.2 К при времени интегрирования 1 с.

Управление процессом измерения выполняется с помощью персонального компьютера 18 через цифровой модуль, встроенный в спектро радиометр и подключенный к компьютеру посредством СОМ-порта. С помощью модуля осуществляется периодическое переключение состояний модулятора-калибратора с частотой ~ 0.1 с, оцифровка и временное усреднение выходных сигналов для каж-



Рис. 2. Внешний вид спектро радиометра.

дого состояния модулятора-калибратора, а также управление процессом термостабилизации прибора. Дальнейшая обработка сигналов, включающая в себя пересчет спектра в антенные температуры, временное усреднение спектра и его графическое отображение, осуществляется в реальном времени в персональном компьютере. Прибор оснащен акселерометром, позволяющим автоматически определять угловые координаты направления приема. Данные измерений сохраняются в выходных файлах персонального компьютера.

Потребляемая прибором мощность без расхода на термостатирование составляет 25 Вт. При работе в полевых условиях за счет работы термостата общее потребление может достигать 60 Вт. Спектро радиометр помещен в термостатированный (с точностью не хуже 0.2 К) корпус, защищенный от неблагоприятных погодных условий.

Внешний вид спектро радиометра, размещенного на поворотном устройстве, приведен на рис. 2.

Предусмотрена процедура первичной абсолютной калибровки модулятора-калибратора, реализуемая с помощью последовательного измерения излучения двух эталонов черного тела, перекрывающих входную апертуру антенны, при трех состояниях модулятора-калибратора. В качестве эталонов используются два поглотителя: один – с температурой окружающего воздуха, а второй – с температурой кипения жидкого азота. Первичная калибровка позволяет осуществить привязку уровней калибровочных сигналов конкретного экземпляра модулятора-калибратора к абсолютным значениям антенных температур с учетом потерь в антенне и входных цепях, а также дает возможность учесть влияние неполного запираания антенного

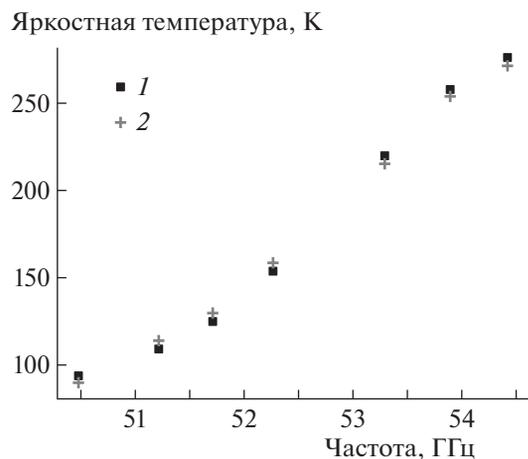


Рис. 3. Спектр яркостной температуры атмосферы. 1 – результаты эксперимента, 2 – значения яркостной температуры, рассчитанные по высотному профилю температуры и влажности.

входа модулятора-калибратора во время калибровочного цикла. В процессе первичной калибровки определяются эффективные температуры излучения модулятора-калибратора, приведенные к входу антенны, и коэффициенты его запыряния. Данные первичной калибровки сохраняются в файле калибровки и используются при измерениях спектра антенного сигнала в реальном времени. Стабильность параметров модулятора-калибратора при условии термостатирования позволяет повторять абсолютную первичную калибровку не чаще одного раза в полгода.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Спектрорадиометр предназначен для дистанционных измерений излучения атмосферы на низкочастотном склоне 5-мм полосы поглощения молекулярного кислорода. Результаты измерений в дальнейшем могут использоваться для восстановления температурного профиля тропосферы от поверхности Земли до тропопаузы [8] и исследования других атмосферных процессов. Пример спектра атмосферного излучения, зарегистрированного с помощью прибора, приведен на рис. 3. Здесь же изображен спектр, рассчитанный по среднесезонному высотному профилю температуры и влажности и модели распространения Liebe [9]. Флуктуационная ошибка измерения яркостной температуры во всех каналах не превышает 0.05 К. Отличие результатов эксперимента от расчетных данных связано, по-видимому, с использованием в оценке не текущего, а среднесезонного профиля метеопараметров.

Другое возможное применение прибора – дистанционное измерение излучательных и рассеивающих характеристик земных покровов по ори-

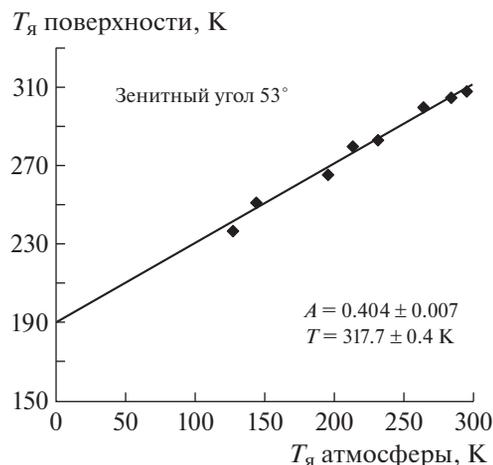


Рис. 4. Результаты измерений излучательных характеристик речного песка (точки), прямая – аппроксимация по методу наименьших квадратов.

гинальной методике, предложенной в работе [3] и использующей нисходящее излучение атмосферы в качестве подсветки. При этом измерения должны проводиться в области спектра с сильной частотной зависимостью интенсивности атмосферного излучения. С помощью описанного спектрорадиометра выполняются измерения спектра нисходящего атмосферного излучения и спектра излучения поверхности в восьми частотных каналах на склонах 5-мм полосы молекулярного кислорода.

Процедуру нахождения физической температуры и альбедо поверхности поясняет рис. 4, где в качестве примера приведены результаты измерений интенсивности излучения сухого речного песка в зависимости от яркостной температуры атмосферы $T_{я}$ под зеркальным углом 53° (точки) для восьми спектральных каналов. Параметры аппроксимирующей по методу наименьших квадратов прямой дают излучательные характеристики покрова. Тангенс угла наклона прямой определяет микроволновое альбедо A исследуемой поверхности. Физическая температура эффективно излучающего слоя T определяется из (1) как:

$$T = \frac{T_0}{1 - A},$$

где T_0 – отсекаемое на оси абсцисс значение яркостной температуры. Измерения проводились в жаркий солнечный день.

Как показали результаты эксперимента, температура поверхностного слоя песка ($T = 317$ К) существенно выше температуры приземного слоя воздуха, составляющей в это время 300 К, и несколько выше показаний контактного термометра (313 К), погруженного в песок на глубину 2 см. Эти различия объясняются сильным нагревом поверхности прямым солнечным излучением и

разницей температур в скин-слое зондирующего излучения и на глубине контактного измерения.

Таким образом, в отличие от одночастотных радиометров, обычно применяемых для зондирования земной поверхности, описанный спектро-радиометр позволяет существенно повысить информативность зондирования, а именно: измерять термодинамическую температуру покрова без априорных данных о его коэффициенте отражения и, наоборот, получать данные о коэффициенте отражения без дополнительной информации о температуре. Кроме того, использование больше двух каналов дает принципиальную возможность оценивать также и некоторые параметры индикатрисы рассеяния земного покрова [10].

Данный спектро-радиометр планируется применять для дистанционных исследований излучательных и рассеивающих характеристик земных покровов и водной поверхности в миллиметровом диапазоне длин волн [11, 12], а также для мониторинга атмосферных процессов, в том числе термического зондирования тропосферы с поверхности Земли [13]. Одновременно получаемые данные о температурном профиле тропосферы и состоянии подстилающей поверхности дают дополнительные возможности исследования механизма взаимодействия атмосферы и поверхности.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-72-10113.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Waters J.W.* // Nature. 1973. V. 242. P. 506. <https://doi.org/10.1038/242506a0>
2. *Швецов А.А., Федосеев Л.И., Караитин Д.А., Большаков О.С., Мухин Д.Н., Скалыга Н.К., Фейгин А.М.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 5–6. С. 356.
3. *Швецов А.А.* А.с. SU 1670649. А1 // БИ. 1991. № 30.
4. *Швецов А.А., Коротаев Д.В., Федосеев Л.И.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2005. Т. 48. № 10–11. С. 905.
5. *Копосова Е.В., Власов С.Н.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 5–6. С. 482.
6. *Thomas B., Mac A.* // IEEE Trans. Antennas Prop. 1978. № 2. P. 367. <https://doi.org/10.1109/TAP.1978.1141842>
7. *Федосеев Л.И., Божков В.Г., Геннеберг В.А., Петров И.В.* Патент 2488941 РФ // БИ. 2013. № 21. <http://allpatent/2488941.html>
8. *Федосеев Л.И., Божков В.Г., Геннеберг В.А., Петров И.В., Шкаев А.П.* // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 10–11. С. 948.
9. *Liebe H.J.* // Int. J. IR & MM Waves. 1989. V. 10. № 6. P. 631.
10. *Швецов А.А.* // Журнал радиоэлектроники. 2012. № 5. С. 2.
11. *Швецов А.А., Беликович М.В., Большаков О.С., Рыскин В.Г., Фейгин А.М., Аверченко А.В., Korabovskiy A.* // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60. № 3. С. 231.
12. *Бубукин И.Т.* // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46. № 4. С. 261.
13. *Наумов А.П., Ошарина Н.Н., Троицкий А.В.* // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 42. № 1. С. 45.