

**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^{а,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

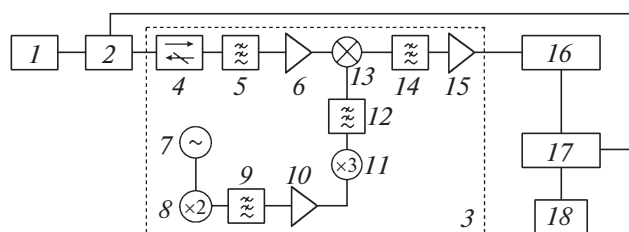


Рис. 1. Структурная схема спектрометра. 1 – антенная система; 2 – модулятор-калибратор; 3 – приемник радиоизлучения миллиметрового диапазона; 4 – волновод; 5 – режекторный фильтр зеркального канала; 6 – усилитель высокой частоты; 7 – синтезатор; 8 – удвоитель частоты; 9, 12 – полосовые фильтры; 10 – 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

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

где $T_{пов}$ – 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 $T_{пов}$.

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 тефлоновую 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 спектрометра 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 спектрометра, 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 спектрометр 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 спектрометра.

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. Спектрометр помещен в термостатированный (с точностью не хуже 0.2 К) корпус, защищенный от неблагоприятных погодных условий.

Внешний вид спектрометра, 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

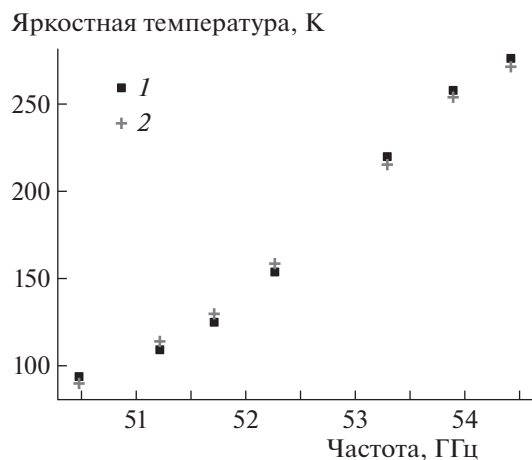


Рис. 3. Спектр яркостной температуры атмосферы. 1 – результаты эксперимента, 2 – значения яркостной температуры, рассчитанные по высотному профилю температуры и влажности.

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-

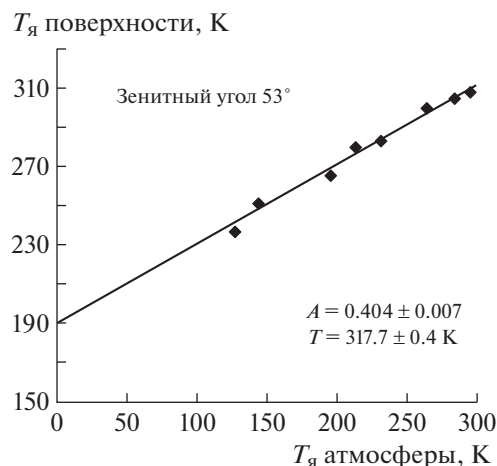


Рис. 4. Результаты измерений излучательных характеристик речного песка (точки), прямая – аппроксимация по методу наименьших квадратов.

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 $T_{\text{я}}$ 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 ($T = 317 \text{ К}$) 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 спектрорадиометр 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 РФФ № 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.