

УДК 504.064.38

## МИКРОВОЛНОВЫЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

*В. Г. Рыскин*\*, *А. А. Швецов*, *М. Ю. Куликов*, *М. В. Беликович*, *О. С. Большаков*,  
*А. А. Красильников*, *Л. М. Кукин*, *И. В. Леснов*, *Н. К. Скалыга*, *А. М. Фейгин*

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Описан микроволновый радиометрический комплекс, предназначенный для дистанционного пассивного мониторинга температуры атмосферы с поверхности Земли. Комплекс состоит из трёх спектрорадиометров, работающих в диапазоне частот 50–60 ГГц, который охватывает центральную часть полосы поглощения молекулярного кислорода и её низкочастотный склон. Радиометры имеют различное спектральное разрешение и позволяют одновременно исследовать термическую структуру приземного воздуха, свободной тропосферы и стратосферы. Для обеспечения внутренней калибровки интенсивности принимаемого радиоизлучения атмосферы используется встроенное в прибор устройство типа модуляторов-калибраторов на основе GaAs-диодов с барьером Шоттки. Прибор оснащён автоматизированной системой управления процессом измерения, калибровки и предварительной обработки данных. По результатам микроволнового зондирования предполагается провести восстановление температурного профиля атмосферы в интервале высот 0,05–55 км, которое основано на байесовом подходе к решению некорректных обратных задач.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение термической структуры атмосферы является важной составляющей в исследованиях климата, метеорологических процессов, а также при решении многих прикладных задач. В настоящее время её температурный мониторинг осуществляется различными средствами как с поверхности Земли (включая аэрозондирование), так и с помощью приборов спутникового базирования. Орбитальные средства, как глобальный инструмент исследований, дают информацию о составе атмосферы в широком интервале высот. Поэтому, к сожалению, они неспособны обеспечить непрерывное температурное зондирование определённого участка атмосферы, которое часто необходимо для изучения быстро протекающих локальных процессов. С другой стороны, наземное аэрозондирование, осуществляемое с помощью радиозондов, позволяет регистрировать температурный профиль атмосферы в месте пуска, однако верхняя граница полёта радиозонда редко превышает 30 км. Непрерывный мониторинг термической структуры атмосферы от поверхности Земли до высот стратосферы (около 55 км) в сочетании с высоким пространственным разрешением можно организовать с помощью наземных дистанционных методов, в которых используется микроволновое тепловое излучение атмосферы [1–3]. Для этой цели разумно регистрировать спектр собственного излучения атмосферы в полосе молекулярного кислорода, центрированной на частоте 60 ГГц и состоящей из 36 вращательных линий. При наблюдении с поверхности Земли эти линии не разрешаются, кроме нескольких, которые расположены на склонах этой полосы (см. рис. 1). На основе методического опыта построения приборов для атмосферных спектральных измерений в Институте прикладной физики РАН был создан наземный микроволновый комплекс для дистанционного измерения вертикального распределения температуры в атмосфере Земли от её поверхности до нижней границы мезосферы.

\* rys@appl.sci-nnov.ru

## 1. МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Радиометрический комплекс состоит из трёх спектрорадиометров, работающих в диапазоне частот  $50 \div 60$  ГГц. Этот интервал частот включает центральную часть полосы поглощения молекулярного кислорода и её низкочастотный склон. Приборы в составе комплекса предназначены для получения данных о температуре в приземном слое воздуха, в свободной тропосфере до высот порядка 10 км и в стратосфере. Все радиометры выполнены по схеме супергетеродинного приёма сигнала с малошумящим НЕМТ- усилителем на входе (см. рис. 2). Каждый прибор включает в себя антенную систему (1), модулятор-калибратор (2) для внутренней калибровки принимаемого сигнала, приёмник миллиметрового излучения (3), анализатор спектра (16), модуль предварительной обработки результатов измерений и управления процессом измерения (17) и персональный компьютер (18).

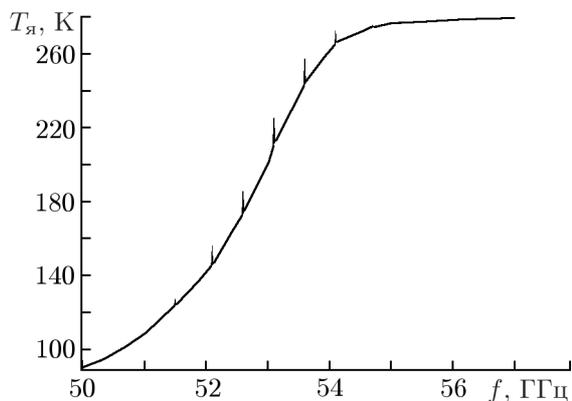


Рис. 1. Спектр яркостной температуры излучения земной атмосферы  $T_{я}$  вблизи полосы молекулярного кислорода

Следует отметить, что для автоматической калибровки интенсивности принимаемого излучения атмосферы используется хорошо зарекомендовавшее себя устройство — модулятор-калибратор [2,4], которое располагается между антенной и входом приёмника. Модулятор-калибратор (см. рис. 3) представляет собой волноводную вставку, которая содержит управляемую внешним источником постоянного тока монолитно-интегральную схему, состоящую из ряда параллельных цепочек последовательно соединённых GaAs-диодов с барьером Шоттки [5]. В зависимости от управляющего тока это устройство может находиться в различных состояниях. При нулевом токе вход и выход модулятора-калибратора сравнительно неплохо (с потерями не более 1 дБ) согласованы с антенной и малошумящим усилителем (через вентиль), между которыми он установлен. В этом случае осуществляется приём собственного излучения атмосферы. При подаче токового смещения на диодную матрицу модулятор-калибратор, во-первых, запирает вход приёмника, ослабляя принятое антенной излучение на  $20 \div 30$  дБ (в зависимости от силы тока), во-вторых, направляет в приёмник собственный шумовой сигнал, температура шума которого в зависимости от величины тока устанавливается на уровнях около 150 («холодная» нагрузка) или 350 К («тёплая» нагрузка). Полученная от этих калибровочных нагрузок информация используется для определения абсолютной величины яркостной температуры собственного излучения атмосферы, поступающего в антенну. Первичная калибровка модулятора-калибратора, т. е. определение зависимостей коэффициента пропускания и температуры его шума от тока смещения, осуществляется в лабораторных условиях по согласованным нагрузкам, находящимся при двух эталонных температурах — температуре кипящего азота и окружающей среды. Получаемый при этом так называемый калибровочный файл может довольно длительное время использоваться в измерениях. Для получения высокостабильных калибровочных уровней модулятор-калибратор термостатирован с точностью не хуже 0,5 К, что позволяет измерять спектр яркостной температуры излучения атмосферы с погрешностью порядка  $0,25 \div 0,30$  К [5].

Общим условием построения всех радиометров является наличие вентиля (элемент 4 на рис. 2) и волноводного режекторного фильтра зеркального канала (5), следующего за модулятором-калибратором и служащего для обеспечения однополосного режима приёма. Коэффициент по-

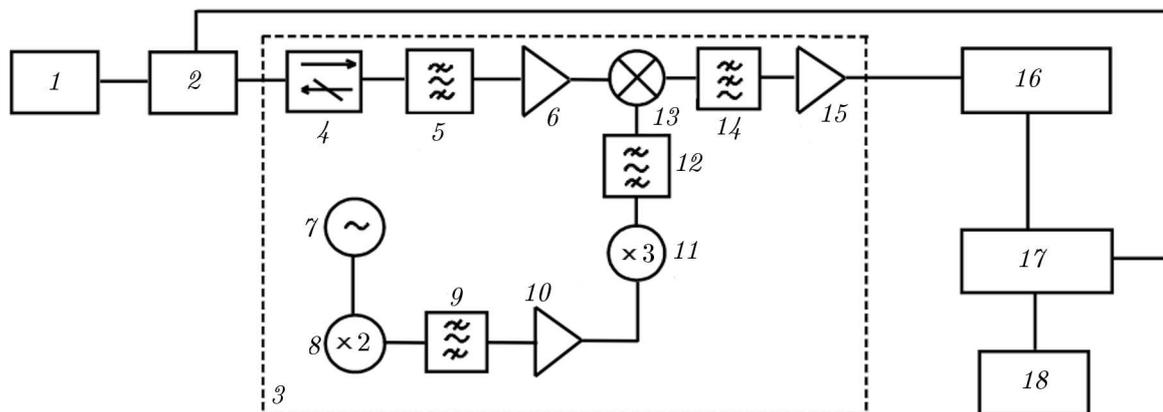


Рис. 2. Типовая схема построения спектро радиометров, входящих в состав комплекса: 1 — антенная система, 2 — модулятор-калибратор, 3 — приёмник миллиметрового радиоизлучения, 4 — вентиль, 5 — режекторный фильтр зеркального канала, 6 — усилитель высокой частоты, 7 — синтезатор, 8 — удвоитель частоты, 9, 12 — полосовой фильтр, 10 — усилитель, 11 — утроитель частоты, 13 — смеситель, 14 — фильтр низких частот, 15 — усилитель промежуточной частоты, 16 — анализатор спектра, 17 — модуль предварительной обработки результатов измерений и управления процессом измерения, 18 — персональный компьютер

давления сигнала зеркальной частоты этим фильтром не менее 20 дБ.

Гетеродинный сигнал смесителя каждого прибора формируется из сигнала синтезатора (элемент 7 на рис. 2), работающего в  $X$ -диапазоне, цепочкой последовательно включённых сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств — удвоителя частоты (8), полосового фильтра (9) и усилителя (10), выполненных в едином корпусе, а также утроителя частоты (11) и волноводного полосового фильтра (12).

Управление процессом измерения спектров атмосферного излучения и работой модулятора-калибратора для их калибровки происходит автоматически в интерактивном режиме с помощью модуля обработки, в состав которого входят аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и микроконтроллер AVR семейства ATmega. Связь с персональным компьютером осуществляется через интерфейсную шину RS-485. Возможен дистанционный режим управления и слежения за работой устройства через интернет при помощи программы «TeamViewer».

## 2. РАДИОМЕТР ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ ВОЗДУХА

Спектро радиометр, предназначенный для измерения температуры в приземном слое воздуха, работает в диапазоне частот  $55 \div 59$  ГГц и имеет три спектральных канала с полосами  $55,2 \div 55,8$ ;  $56,0 \div 57,0$  и  $57,4 \div 59,0$  ГГц. Информация о высотном профиле температуры извлекается из анализа угловой зависимости яркостной температуры атмосферы, которая получается путём сканирования антенной системы по углу места. Сканирование осуществляется с помощью шагового двигателя типа FL86STH118-6004A, который управляется по программе с персонального компьютера. Для обеспечения высокой разрешающей способности при малых углах места требуется антенная система с узкой диаграммой направленности. С помощью двухзеркальной системы, состоящей из вырезок параболической и гиперболической формы и облучаемой скалярным рупором, удалось достичь ширины диаграммы направленности около  $2^\circ$ . Такая сложная система, помимо узкой диаграммы направленности, может на 20 дБ подавлять кросс-поляризационные

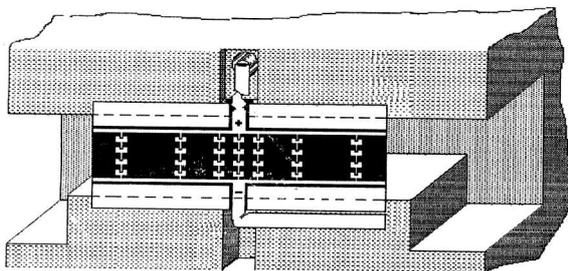


Рис. 3. Модулятор-калибратор в волноводном тракте спектро радиометра

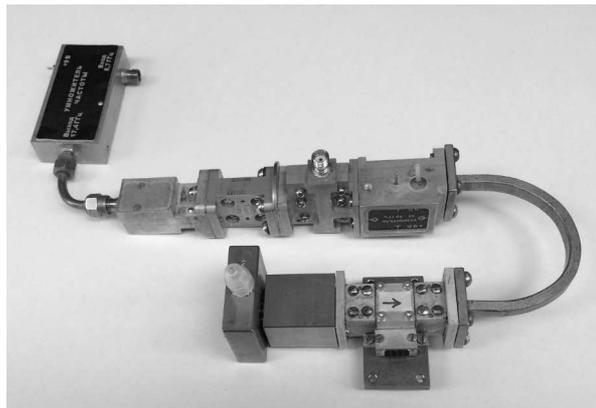


Рис. 4. Высокочастотный тракт приёмника спектро радиометра для термического зондирования приземного слоя воздуха

лепестки, которые при низких углах могут вызывать ложные сигналы.

Приёмник супергетеродинного типа, выполненный с фильтром зеркального канала и усилителем высокой частоты на входе, имеет однопольную шумовую температуру около 1500 К в указанном выше интервале частот. Сигнал гетеродина с частотой 52,2 ГГц сформирован из сигнала синтезатора, частота которого составляет 8,7 ГГц, с помощью цепи последовательного частотного умножения. Высокочастотный тракт приёмника показан на рис. 4. Спектральный анализ осуществляется в тракте промежуточных частот 3,0÷6,8 ГГц с помощью триплексера, который в каждом спектральном канале содержит усилитель, полосно-пропускающий фильтр, квадратичный детектор и усилитель низкой частоты, имеющий полосу пропускания около 200 Гц. Цикл измерения состоит из трёх последовательных отсчётов: приём собственного излучения атмосферы и приём двух эталонных калибровочных уровней. Оцифровка с помощью АЦП сигналов спектральных каналов выполняется с частотой 7 кГц при времени регистрации каждого уровня порядка 100 мс.

### 3. РАДИОМЕТР ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СВОБОДНОЙ ТРОПОСФЕРЫ

Для измерения температурного профиля в свободной тропосфере до высот порядка 10 км используется спектро радиометр со средним спектральным разрешением. Частотный анализ в интервале 50÷55 ГГц, который соответствует низкочастотному склону полосы молекулярного кислорода, осуществляется с помощью восьмиканального банка аналоговых фильтров.

Антенная система спектро радиометра состоит из фторопластовой просветлённой линзы и конического гофрированного облучателя. Облучатель был рассчитан и изготовлен по методике, описанной в работе [6]. Он излучает аксиально симметричный гауссов пучок с углом полураствора 21°. Параметры рупора позволили выполнить облучение с малыми потерями всей поверхности линзы и обеспечить коэффициент стоячей волны по выходу не более 1,1 во всей полосе рабочих частот. Просветление линзы выполнено согласно расчётам, представленным в работе [7], с помощью концентрических канавок с треугольным сечением. Диаметр линзы составляет 138 мм, фокусное расстояние 207 мм. Измеренные потери в линзе не превышали 1%, что удовлетворительно совпадает с результатами расчёта. Ширина диаграммы направленности всей антенной системы на уровне  $-3$  дБ составила около  $2,5^\circ$ .

Приёмник миллиметрового излучения супергетеродинного типа с малошумящим НЕМТ-усилителем (МШУ) на входе работает следующим образом. Усилитель обеспечивает в рабочей полосе частот коэффициент усиления 16 дБ и коэффициент шума не более 4 дБ. Балансный смеситель на диоде с барьером Шоттки (ДБШ), следующий за МШУ и работающий на первой гармонике сигнала гетеродина с частотой 48 ГГц, преобразует входной сигнал в диапазон промежуточных частот  $2 \div 7$  ГГц. Потери при этом преобразовании составляют  $8 \div 10$  дБ. Гетеродинный сигнал смесителя (48 ГГц) формируется из сигнала синтезатора (8 ГГц) с выходной мощностью 50 мВт цепочкой последовательно включённых СВЧ устройств: удвоителя частоты, полосового фильтра и усилителя, выполненных в едином корпусе, а также утроителя частоты и волноводного полосового фильтра на 48 ГГц. На входе смесителя уровень мощности сигнала гетеродина составляет не менее 10 мВт с подавлением побочных гармоник частоты синтезатора не менее, чем на 50 дБ.

Спектральный анализ сигнала осуществляется в диапазоне промежуточных частот  $2 \div 7$  ГГц с помощью 8-канального банка полосовых фильтров. Ширина полос пропускания фильтров оптимизирована с учётом формы спектра излучения атмосферы и варьируется от 150 до 500 МГц. Расположение каналов анализатора (центральная частота канала по высокой частоте  $f_{ВЧ}$  и по промежуточной  $f_{ПЧ}$  и их полосы частот  $\Delta f$ ) представлены в табл. 1. Управление процессом измерения атмосферного сигнала и его калибровки осуществляется способом, аналогичным описанному в предыдущем разделе. Шумовая температура спектро радиометра в режиме однополосного приёма (single side band, SSB), приведённая к апертуре антенны, не превышала 1 400 К. Внешний вид прибора показан на рис. 5.

Таблица 1

Номер канала	$f_{ВЧ}$ , ГГц	$f_{ПЧ}$ , ГГц	$\Delta f$ , МГц
1	50,470	2,470	500
2	51,210	3,210	300
3	51,710	3,710	300
4	52,270	4,270	300
5	52,705	4,705	150
6	53,285	5,285	150
7	53,900	5,900	300
8	54,420	6,420	500

#### 4. РАДИОМЕТР ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СТРАТОСФЕРЫ

Для исследования термического режима стратосферы предназначен третий радиометр, работающий в диапазоне частот  $52,45 \div 53,5$  ГГц. Этот диапазон включает в себя две слабые линии  $O_2$ :  $27_-$  (резонансная частота 52542,39 МГц) и  $29_-$  (резонансная частота 53066,91 МГц), которые разрешаются с поверхности Земли, а также склон кислородной полосы между ними.

Антенная система радиометра состоит из скалярного рупора, который обеспечивает ширину диаграммы направленности по половинному уровню около  $4^\circ$  с низким уровнем боковых лепестков.

В приёмнике миллиметрового излучения используется малошумящий усилитель высокой частоты, выполненный на основе микросхемы СНА2159, который в указанном выше диапазоне частот имеет коэффициент усиления 20 дБ и коэффициент шума 5 дБ. Следующий за усилителем смеситель на диодах с барьером Шоттки имеет потери преобразования около 6 дБ. Сигнал гетеродина с частотой 52,32709 ГГц формируется из сигнала синтезатора с частотой 8,74 ГГц с помощью последовательной цепочки умножителей и усилителей мощности. С выхода усилителя промежуточной частоты сигнал через низкочастотный фильтр с полосой пропускания  $0,1 \div 1,0$  ГГц поступает на цифровой анализатор спектра высокого разрешения.

Цифровой анализатор спектра фирмы «Acqiris» (АС240), работающий в режиме быстрого преобразования Фурье, осуществляет непрерывную параллельную работу 16384 эффективных спектральных каналов в полосе промежуточных частот от 0 до 1 ГГц, обеспечивая высокое частотное

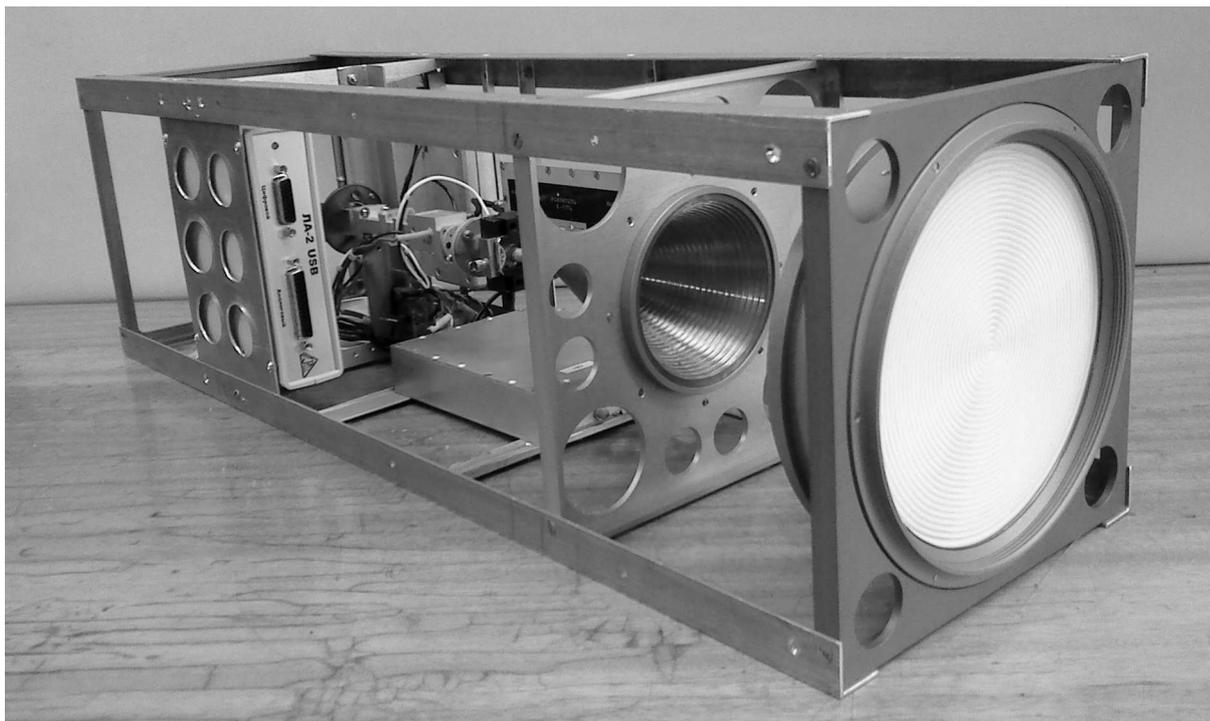


Рис. 5. . Внешний вид спектро радиометра для термического зондирования свободной тропосферы

разрешение (около 64 кГц). В выходном буфере устройства полученные спектры последовательно накапливаются при трёх состояниях модулятора-калибратора. Типичное время накопления несколько секунд. Накопленные спектры для каждого состояния модулятора-калибратора считываются в оперативную память персонального компьютера. После дополнительного усреднения рассчитывается спектр яркостной температуры измеряемого атмосферного сигнала. Управление переключением модулятора-калибратора и фурье-спектрометром осуществляется с помощью соответствующей программы.

Шумовая температура спектро радиометра, измеренная на входе антенны, составила около 1400 К в однопосном режиме, что соответствует чувствительности 0,2 К в полосе спектрального канала 64 кГц за время усреднения 1 час с учётом флуктуационной ошибки периодической калибровки. Внешний вид радиометра приведен на рис. 6.

В рамках тестовых экспериментальных кампаний были получены спектры яркостной температуры собственного излучения атмосферы, которые показаны на рис. 7.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлен микроволновый радиометрический комплекс, позволяющий в непрерывном режиме измерять спектры собственного излучения атмосферы в диапазоне частот 50÷60 ГГц. Восстановление вертикальных распределений температуры воздуха в диапазоне высот 0÷55 км по этим данным будет осуществляться на основе алгоритма, описанного в работах [2, 8]. Не останавливаясь на его подробном изложении, отметим, что восстановление профиля температуры по данным радиометрического зондирования является некорректной обратной задачей, решение которой требует статистически правильного (основанного на теореме Байеса) учёта как шума данных измерений, так и априорной информации. Исходная экспериментальная информа-

ция представляет собой частотный спектр яркостной температуры собственного излучения атмосферы. Искомый температурный профиль связан с измеряемым спектром посредством нелинейного интегрального преобразования, которое определяется решением уравнения переноса излучения. При этом сечения поглощения атмосферы в рассматриваемом диапазоне частот являются известными функциями частоты и температуры, параметризованными в рамках полуэмпирической модели Либбе–Розенкранца. На основании этой связи, предположения об аддитивности шума измерений, выбора класса функций, параметризующих искомый профиль температуры, и теоремы Байеса проводится построение апостериорной условной плотности вероятности. Результатом восстановления является наиболее вероятный профиль температуры, соответствующий максимуму этой плотности вероятности. Максимизация проводится посредством алгоритма BFGS (алгоритм Бройдена–Флетчера–Гольдфарба–Шанно, разновидность квазиньютоновского метода). В свою очередь, привлечение метода Метрополиса–Гастинга позволяет сформировать ансамбль возможных профилей и на его основе определить доверительные интервалы с заданным уровнем вероятности для каждой рассматриваемой высоты или любые другие статистические характеристики ошибок.

На основании восстановления профилей температуры по спектрам, измеренным над Нижним Новгородом с помощью представленного комплекса, а также компьютерного моделирования симуляции, была проведена оценка точности восстановления температуры (т. е. полуширины доверительного интервала, в который попадает 65 % профилей) в зависимости от высоты. Было установлено, что в тропосфере при времени накопления 1 мин полуширина составляет  $0,5 \div 1,0$  К в диапазоне высот  $50 \div 500$  м, примерно 1 К в диапазоне высот  $0,5 \div 3,0$  км, 1,5 К на высоте порядка 5 км и плавно повышается до 5 К на высотах тропопаузы. В стратосфере, где требуются большие времена накопления, точность восстановления температуры составляет  $3 \div 6$  К в зависимости от высоты при времени накопления 50 мин.

В заключение укажем два основных отличия созданного комплекса от прибора TEMPERA [3], разработанного в Институте прикладной физики Университета Берна (Швейцария). Во-первых, наш прибор имеет более узкую диаграмму направленности (около  $2^\circ$ ) и более широкую полосу приёма и анализа собственного излучения атмосферы ( $50 \div 60$  ГГц), что, в отличие от прибора TEMPERA (его полоса  $51 \div 57$  ГГц), позволяет осуществлять мониторинг температуры приземного слоя, начиная с высоты примерно 50 м. Во-вторых, наш комплекс является мобильным и малогабаритным прибором, что, в принципе, позволяет проводить измерения практически в любой интересующей нас точке пространства с выбранными горизонтальными координатами.



Рис. 6. Внешний вид спектро радиометра для термического зондирования стратосферы

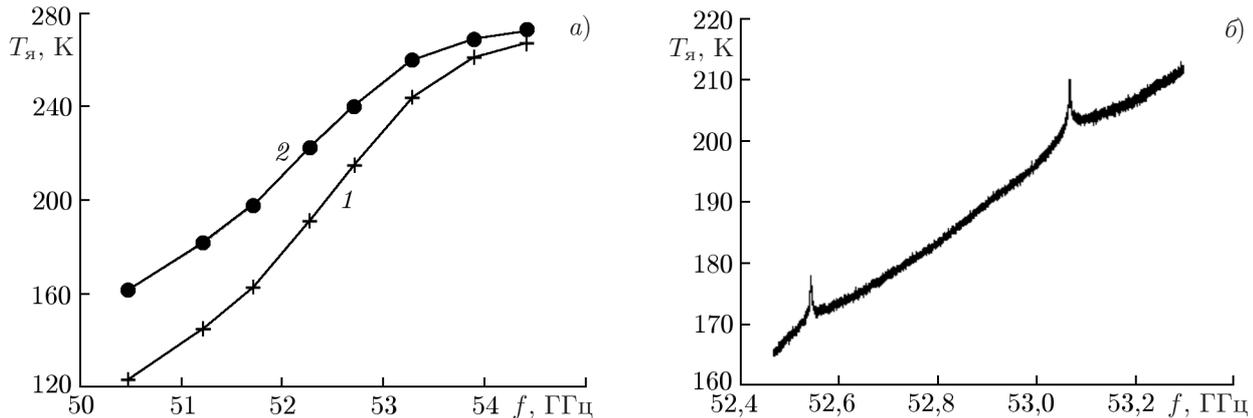


Рис. 7. Спектры яркостной температуры собственного излучения атмосферы, полученные в рамках тестовых измерений 16:21÷16:22 05.02.2015 (а, кривая 1), 18:45÷18:46 19.02.2015 (а, кривая 2), 05:30÷06:20 28.01.2013 (б)

натами, в том числе, размещать его на автомобилях, поездах, самолётах, кораблях. В отличие от этого комплекс ТЕМПЕРА представляет собой заключенную в контейнер термостатированную лабораторию, которая требует специальных средств для перемещения.

Работа выполнена при поддержке ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса на 2014–2020 годы» (соглашение о предоставлении субсидии 14.607.21.0107 от 28 ноября 2014 года между Министерством образования и науки РФ и ФГБУН ИПФ РАН, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60714X0107).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Troitskij A. V., Gaikovich K. P., Gromov V. D., et al. // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 1993. V. 31, No. 1. P. 116.
2. Швецов А. А., Федосеев Л. И., Караштин Д. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 5–6. С. 356.
3. Stähli O., Murk A., Kämpfer N., et al. // Atmos. Meas. Tech. 2013. V. 6. P. 2477.
4. Красильников А. А., Куликов М. Ю., Кукин Л. М. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. Т. 56, № 8–9. С. 699.
5. Пат. 2488941 РФ. МПК H03B 29.00. Электрически управляемый модулятор-калибратор миллиметрового диапазона длин волн / Федосеев Л. И., Божков В. Г., Геннеберг В. А., Петров И. В. Опубл. 27.07.2013. Бюл. № 21. 7 с.
6. Thomas V. // IEEE Trans. Antennas Prop. 1978. V. 26, No. 2. P. 367.
7. Власов С. Н., Копосова Е. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 5–6. С. 482.
8. Куликов М. Ю., Красильников А. А., Швецов А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2015. Т. 58, № 6. С. 454.

Поступила в редакцию 21 апреля 2016 г.; принята в печать 25 июля 2016 г.

**MICROWAVE RADIOMETRIC COMPLEX FOR STUDYING THE THERMAL STRUCTURE OF THE EARTH'S ATMOSPHERE**

*V. G. Ryskin, A. A. Shvetsov, M. Yu. Kulikov, M. V. Belikovich, O. S. Bol'shakov, A. A. Krasilnikov, L. M. Kukin, I. V. Lesnov, N. K. Skalyga, and A. M. Feigin*

We describe the microwave radiometric complex intended for remote passive monitoring of the atmospheric temperatures from the Earth's surface. The complex consists of three spectroradiometers operating in the frequency range 50–60 GHz, which covers the central part of the absorption band of molecular oxygen and its low-frequency slope. The radiometers have different spectral resolutions and allow one to simultaneously study the thermal structure of the surface air, free troposphere, and stratosphere. To ensure internal calibration of intensity of the received atmospheric radiation, the built-in device of the modulator-calibrator type based on the GaAs diodes with the Schottky barrier are used. The COMPLEX is equipped with an automated system to perform the measurement-process control, calibration, and preliminary data processing. Using the microwave sensing results, we intend to retrieve the atmospheric temperature profiles in the altitude interval 0.05–55 km on the basis on the Bayesian approach to solving ill-posed inverse problems.