

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.382.2

МИКРОВОЛНОВЫЙ СПЕКТРОРАДИОМЕТР ДЛЯ НАЗЕМНОГО
КОМПЛЕКСА ТЕМПЕРАТУРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СТРАТОСФЕРЫ

© 2011 г. А. А. Швецов, Л. И. Федосеев, О. С. Большаков, Д. А. Караштин

Институт прикладной физики РАН

Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46

E-mail: fedoseev@appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 16.07.2010 г.

Разработан лабораторный образец спектро радиометра для комплекса наземного термического зондирования средней атмосферы, позволяющего на основе измеренных спектров собственного излучения атмосферы в диапазоне частот 52.45–53.2 ГГц восстанавливать вертикальное распределение температуры в стратосфере и верхней тропосфере. Полученные в ходе испытательного цикла круглосуточных наблюдений профили температуры в интервале высот 10–55 км хорошо согласуются со спутниковыми данными.

Термическая структура стратосферы и верхней тропосферы является одной из важнейших характеристик атмосферы, определяющих происходящие в ней динамические и фотохимические процессы. Высотное распределение температуры в настоящее время измеряется, как правило, дистанционными методами, а основной объем информации о температуре средней атмосферы поступает из спутниковых измерений, к числу которых относится микроволновое зондирование в полосе поглощения атмосферного кислорода, центрированной к длине волны 5 мм. Однако спутниковые измерения не обеспечивают непрерывное получение данных над областью поперечником 10–100 км, необходимое для исследования ряда быстро протекающих локальных процессов. Отметим, что еще до появления лимбового зондирования обсуждался вопрос (см., например, [1–3]) о наземном температурном зондировании атмосферы в отдельных линиях молекулярного кислорода, лежащих на склоне вышеупомянутой 5-миллиметровой полосы. К сожалению, по ряду аппаратных и алгоритмических причин, подробно рассмотренных в [4], реализовать такой способ пока не удавалось. Ниже кратко описаны особенности устройства и характеристики спектро радиометра, успешно использованного в составе наземного комплекса дистанционного температурного зондирования атмосферы в интервале высот 10–55 км.

Комплекс включает в себя следующие основные блоки: антенную систему, модулятор-калибратор, блок приемника, цифровой анализатор спектра, систему управления, сбора и обработки данных на основе персонального компьютера.

Антенная система состоит из внеосевой вырезки из параболоида вращения с облучателем в виде конического рупора с изломом, обеспечивающе-

го малые потери на переоблучение зеркала и низкий уровень боковых лепестков. Ширина диаграммы направленности по половинному уровню составляет 3.3°.

Модулятор-калибратор представляет собой управляемый током волноводный переключатель с рядом параллельных цепочек диодов с барьером Шоттки (д.б.Ш.) [5], обеспечивающий или подключение антенны ко входу приемника (с потерями ~0.5 дБ), или подачу на него калибровочного шумового сигнала, эффективная температура которого может изменяться от ≈155 до 350 К [6]. Сигнал от модулятора-калибратора подается на вход блока приемника через развязывающий вентиль.

Блок приемника начинается с малошумящего усилителя высокой частоты (на основе микросхемы СНА2159), стоящего на входе супергетеродина, нижний зеркальный канал которого подавлен преселектором на 22 дБ. Гетеродинный сигнал частоты 52.39709 ГГц, подаваемый на д.б.Ш.-смеситель, формируется синтезатором и последовательной цепочкой умножителей частоты и усилителей мощности (стабильность и точность установки частоты не хуже 10⁻⁷). После усилителя промежуточной частоты (0.1–2 ГГц) одна часть выходного сигнала подается на квадратичный детектор с усилителем постоянного тока, другая (0.1–1 ГГц) через низкочастотный фильтр – на цифровой анализатор спектра. Приемник вместе с антенной системой размещен в термостатированном кожухе с радиопрозрачным окном. Шумовая температура приемника, измеренная с входа антенны, не превышает 1400 К.

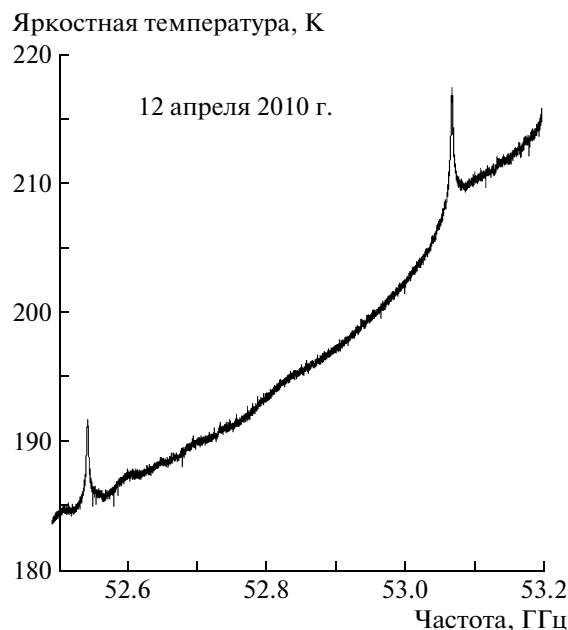
Цифровой анализатор спектра фирмы Acqiris (модель АС240), работающий в режиме быстрого преобразования Фурье, осуществляет непрерыв-

ную работу 16384 эффективных спектральных каналов в полосе 1 ГГц [7], обеспечивая частотное разрешение 61.04 кГц. Включенный между усилителем промежуточной частоты и анализатором спектра фильтр с резкой высокочастотной границей предотвращает искажения спектра, связанные с дискретностью используемого преобразования Фурье [7].

Система управления осуществляет управление модулятором-калибратором, сбор и обработку данных с помощью модуля а.ц.п.—ц.а.п. ЛА2-USB фирмы ЗАО “Руднев—Шиляев” (Москва), сопряженного с персональным компьютером. Соответствующее программное обеспечение позволяет в режиме реального времени получать спектр излучения атмосферы, визуализировать и записывать в файлы спектры яркостной температуры, варьировать полосы анализа, время накопления сигналов, параметры калибровочных сигналов, т.е. полностью управлять процессом измерений.

Испытание комплекса проводилось во время цикла измерений высотного распределения температуры над Нижним Новгородом в марте—апреле 2010 года. Круглосуточное зондирование велось под зенитным углом 40° через затянутые тонкой лавсановой пленкой окна на северной и южной сторонах здания. Измерения проводились одновременно в двух спектральных линиях молекулярного кислорода (52.542 и 53.066 ГГц), расположенных на склоне 5-миллиметровой кислородной полосы поглощения. Для контроля стабильности работы комплекса один раз в сутки проводилась дополнительная его калибровка по излучению двух согласованных нагрузок (находящейся при комнатной температуре и охлаждаемой кипящим азотом). На рисунке приведен пример усредненного за 2 ч измерений спектра яркостной температуры атмосферы в направлении, примерно параллельном магнитному полю. При этом наблюдалось вызванное эффектом Зеемана заметное уширение линий по сравнению со случаем зондирования в направлении, перпендикулярном магнитному полю.

Полученные спектры были использованы для восстановления высотного профиля температуры стратосферы методом [4], основанным на байесовом подходе к решению обратных задач и позволяющим статистически корректно учесть как измерительный шум, так и априорную информацию о восстанавливаемом профиле, необходимую для регуляризации задачи. В результате были найдены наиболее вероятные высотные распределения температуры и границы 95%-ного доверительного интервала: на средних высотах зондирования (около 30 км) ширина этого интервала составляет ≈ 5 К, на крайних высотах (10–15 и 45–55 км) она увеличивается в 2–4 раза. Полученные данные хорошо согласуются с результатами спутникового зондирования в эти же дни [8].



Пример записи спектра яркостной температуры атмосферы.

Авторы благодарят А.М. Щитова и В.Г. Божкова за сотрудничество в создании компонент спектро-радиометра, а также А.М. Фейгина и Д.Н. Мухина за поддержку работы и полезные дискуссии.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 07-05-00595), Программы фундаментальных исследований ОФН РАН “Проблемы радиофизики”, Программы фундаментальных исследований ОФН РАН “Физика атмосферы: электрические процессы, радиофизические методы исследования”, Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” на 2009–2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Waters J.W. // Nature. 1973. V. 242. № 5399. P. 506.
2. Маркина Н.Н. // Радиотехника и электроника. 1996. Т. 41. № 2. С. 175.
3. Наумов А.П., Ошарина Н.Н., Троицкий А.В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1999. Т. 52. № 1. С. 45.
4. Караитин Д.А., Мухин Д.Н., Скальга Н.К., Фейгин А.М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2009. Т. 73. № 12. С. 1755.
5. Федосеев Л.И., Божков В.Г., Геннеберг В.А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50. № 10–11. С. 948.
6. Федосеев Л.И., Швецов А.А., Шкаев А.П. и др. // 18-я Международная Крымская конференция “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” (КрыМиКо 2008): Материалы конференции. Севастополь: Вебер, 2008. Т. 2. С. 878.
7. Müller S.C., Kämpfer N., Monstein C. et al. // Proc. SPIE. Oct. 2005. V. 5979. P. 280.
8. <http://mirador.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/mirador/presentNavigation.pl?tree=project&project=MLS>