

06;07;08;09

## **Характеристики акустооптического спектрометра для дистанционного зондирования атмосферы на миллиметровых радиоволнах**

© *Н.А. Есепкина, С.К. Круглов, С.Б. Розанов,  
И.И. Саенко, С.В. Соломонов*

С.-Петербургский государственный технический университет (СПбГТУ)  
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН)

*Поступило в Редакцию 16 января 2002 г.*

Рассмотрены основные характеристики акустооптического спектрометра с полосой анализа 500 MHz и особенности его применения в наземном комплексе для измерения спектральной линии излучения атмосферного озона с центральной частотой 142.175 GHz. Приведены результаты измерений параметров акустооптического спектрометра и тестовых наблюдений спектров атмосферного озона.

Отмечаемое в последние годы ухудшение состояния защитного озонового слоя атмосферы Земли, появление в нем неблагоприятных аномальных явлений определяют возрастающий интерес к методам контроля пространственно-временного распределения атмосферного озона и разработке приборных комплексов для оперативного и надежного мониторинга озоносферы. Дистанционное зондирование атмосферного озона на миллиметровых радиоволнах является одним из наиболее эффективных методов мониторинга. По форме уширенных давлением вращательных спектральных линий собственного теплового излучения озона, измеренных с поверхности Земли, можно определить вертикальное распределение озона в атмосфере на высотах примерно от 15 до 75 km [1,2].

Для реализации известных достоинств метода микроволнового дистанционного зондирования (возможность круглосуточных непрерывных наблюдений, относительно слабая зависимость от погодных условий, широкая область зондируемых высот) необходимы высокочувствительные радиометры и широкополосные, с полосой анализа в несколько

сотен мегагерц, стабильные и надежные спектрометры, среди которых важное место занимают акустооптические спектрометры (АОС).

Разрабатываемые в течение ряда лет в СПбГТУ акустооптические спектроанализаторы успешно применялись в радиоастрономических приемных комплексах [3,4]. Некоторые характеристики широкополосного АОС, предназначенного для применения в микроволновом озонометре, созданном в ФИАН [2,5], обсуждаются в данной статье.

Входная часть озонометра представляет собой двухлучевой супергетеродинный приемник излучения 2-миллиметрового диапазона. Параллельные лучи шириной около  $1.5^\circ$  по уровню  $-3$  dB переключаются с частотой 75 Hz с помощью обтюлятора и системы зеркал. Один из лучей („опорный“) перекрывается чернотельной нагрузкой, охлажденной жидким азотом и имеющей яркостную температуру  $T_c = 110$  K. Второй луч („сигнальный“) направлен на небо, для которого частотная зависимость яркостной температуры определяется в основном вращательной спектральной линией озона с центральной частотой 142.175 GHz (переход  $10_{0,10} - 10_{1,9}$ ). При калибровке приемника этот луч перекрывается нагрузкой, находящейся при комнатной температуре  $T_0$ .

Входной сигнал и колебания первого гетеродина с частотой 140.42 GHz через квазиоптический диплексер (модифицированный интерферометр Маха–Цендера) и скалярный рупор поступают в волноводный смеситель. В смесителе на планарном диоде с барьером Шоттки входной сигнал преобразуется в полосу частот АОС 1.5–2.0 GHz. Изменением разности хода диплексера приемник настраивается на работу в двухполосном или однополосном режиме. Двухполосная шумовая температура приемника составляет 650–700 K в средней части анализируемой полосы частот. Система фазовой автоподстройки частоты первого гетеродина обеспечивает кратковременную (за 0.2 s) относительную стабильность его частоты около  $2 \cdot 10^{-8}$ .

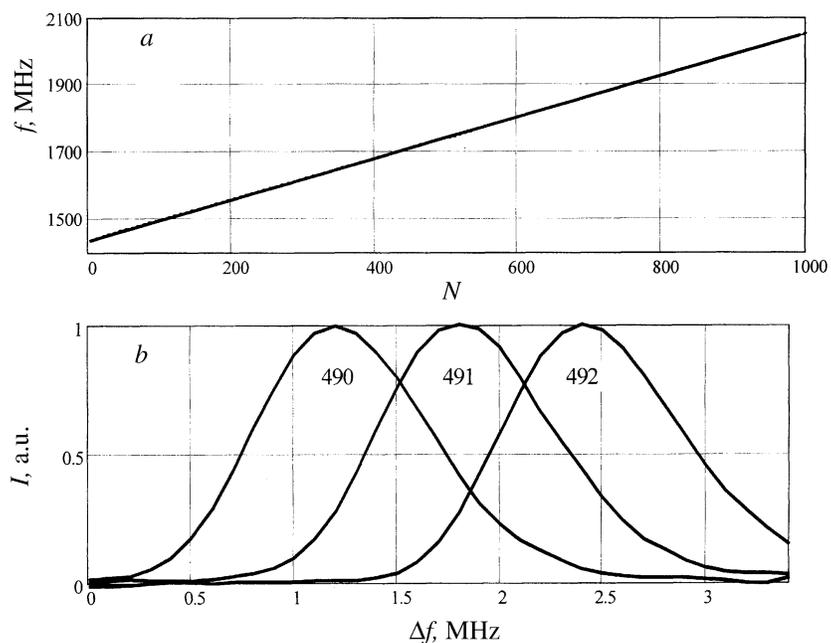
Принятый сигнал после преобразования в диапазон частот 1.5–2.0 GHz и усиления обрабатывается в акустооптическом спектроанализаторе. АОС представляет собой оптоэлектронную систему, оптическая часть которой разработана по традиционной схеме акустооптического фурье-процессора с пространственным интегрированием и включает источник когерентного света (гелий-неоновый лазер), анаморфотную систему коллимации оптического пучка, акустооптический дефлектор на кристалле ниобата лития (центральная частота 1750 MHz, временная апертура  $1.5 \mu\text{s}$ , эффективность  $1.5 \cdot 10^{-2} \text{W}^{-1}$ ) и фурье-

объектив. В выходной плоскости оптического процессора расположен многоэлементный линейный фотоприемник на приборе с зарядовой связью (ПЗС), содержащий 2048 светочувствительных элементов размером  $14 \times 14 \mu\text{m}$ . Конструктивно оптический процессор выполнен в виде модуля, содержащего несколько отдельно настраиваемых оптико-механических узлов, расположенных на поверхности опорной плиты. Размеры оптического модуля составляют  $400 \times 250 \times 120 \text{ mm}$ .

В выходной плоскости оптического процессора распределение освещенности по одной из координат линейно связано со спектральным распределением мощности принятого сигнала. Считывание этого распределения, его дискретизация и преобразование в электрический сигнал осуществляются ПЗС-фотоприемником. Интегрирование зарядовых пакетов в элементах фотоприемника и их последовательный вывод из сдвигового регистра позволяют получить дискретизованный спектр сигнала. Полоса пропускания эквивалентного фильтра каждого канала и общее число каналов определяются характеристиками элементов оптического процессора и фотоприемника. При этом высокая точность настройки всей совокупности спектральных каналов обеспечивается высокой точностью расположения элементов фотоприемника.

Частотная градуировка каналов АОС, проведенная при подготовке комплекса к наблюдениям, приведена на рис. 1, *a*. Ширина полосы анализа спектрометра по уровню  $-3 \text{ dB}$  составила  $500 \text{ MHz}$ . Максимальная величина отклонения градуировки частотной шкалы от линейной аппроксимации не превышает  $\pm 0.25\%$  от полосы анализа. Указанная нелинейность частотной шкалы приводит к небольшим вариациям ширины полосы спектральных каналов, не превышающим  $\pm 2\%$  от средней ширины полосы одного канала в пределах всей полосы анализа. В качестве примера на рис. 1, *b* показаны частотные характеристики трех соседних каналов АОС. Ширина полосы каждого канала по уровню  $-3 \text{ dB}$  равна  $0.9 \text{ MHz}$ , а шаг следования частотных каналов составляет около  $0.6 \text{ MHz}$ .

Длительное накопление, необходимое при наблюдении слабых сигналов, предъявляет достаточно жесткие требования к стабильности амплитудных и частотных характеристик АОС. Измерения долговременной стабильности частотной градуировки АОС показали, что при изменении окружающей температуры частотная шкала сдвигается как целое, практически не меняя своей формы, поэтому с приемлемой точностью коррекцию частотной градуировки АОС можно проводить

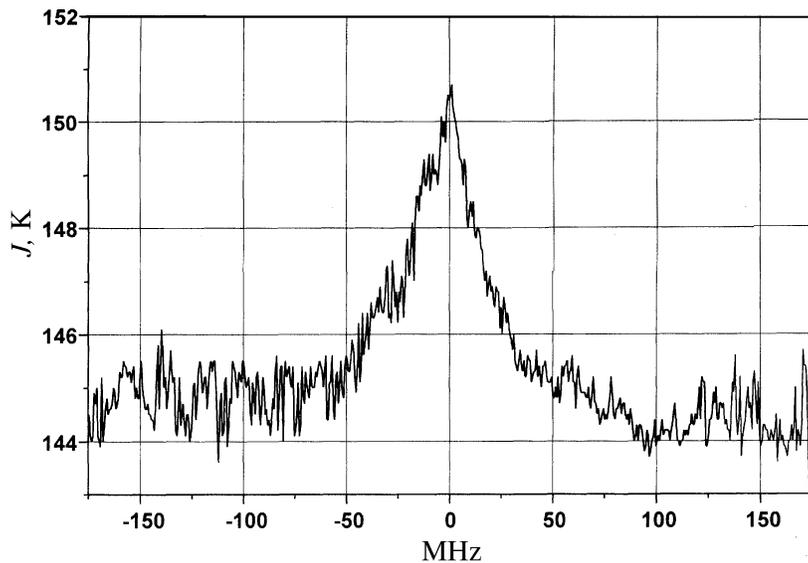


**Рис. 1.** *a* — частотная градуировка шкалы акустооптического спектрометра с полосой 500 MHz ( $N$  — номер канала); *b* — частотные характеристики трех соседних каналов АОС ( $\Delta f$  — изменение частоты).

при вторичной обработке спектров, если в процессе наблюдений регистрировать положение отклика на сигнал стабильного частотного репера относительно выбранных элементов фотоприемника [4].

Оценка долговременной амплитудной стабильности АОС проводилась на основании результатов измерения зависимости спектрометрической дисперсии Аллана от времени накопления [6]. Полученная величина эффективного времени накопления между амплитудными калибровками составила не менее 300 с.

Амплитудная характеристика АОС измерялась при гармоническом и шумовом входном сигнале. Линейный участок амплитудной характеристики соответствует изменению входного сигнала в пределах 24 dB



**Рис. 2.** Спектр излучения атмосферного озона, полученный при зенитном угле зондирования  $60^\circ$ . Время калибровки 96 s, время измерения 192 s,  $T_c = 110$  K,  $T_0 = 299$  K. Двухполосный режим. По оси  $x$  отложена величина отстройки от центра линии.

и ограничивается параметрами системы обработки выходного сигнала оптического процессора.

Система сбора данных АОС на основе цифрового сигнального процессора ADSP2181 обеспечивает управление фотоприемником по заданной программе, аналого-цифровое преобразование сигнала, предварительную цифровую обработку данных и их буферное накопление с последующей передачей в компьютер для регистрации в виде файлов. На этапе предварительной обработки в сигнальном процессоре производится раздельное накопление спектров сигналов каждого из двух лучей с переключением буферных накопителей в темпе модуляции входного (синхронное накопление).

Последующая обработка массивов данных, записанных в файлы, включает в себя на первом этапе их поэлементное усреднение в течение

выбранного интервала накопления и вычисление разностных спектров сигналов от двух лучей, пропорциональных калибровочной и измеряемой разностям температур. После этого рассчитывается спектр яркостной температуры неба, содержащий искомую линию излучения озона [2,5]. Один из спектров озона в полосе частот 350 МГц (570 каналов АОС), полученный по такой методике в Москве в июне 2001 г. при тестовых наблюдениях с использованием описанного комплекса, показан на рис. 2. Приемник был настроен на двухполосный режим, а ослабление спектральной линии тропосферой составляло около 3 дВ. На следующих этапах обработки проводится суммирование отдельных спектров, подобных приведенному на рис. 2, и восстановление вертикального распределения озона [2].

Результаты измерений характеристик широкополосного акустооптического спектрометра и успешное проведение пробных наблюдений спектров озона с использованием АОС подтверждают целесообразность применения таких спектрометров в составе существующих и разрабатываемых наземных комплексов дистанционного зондирования малых газовых составляющих атмосферы в миллиметровом диапазоне волн.

Работа поддержана Советом по поддержке ведущих научных школ (гранты № 00-15-99-071 и 00-15-96586) и РФФИ (гранты № 99-02-18132, 00-02-17405а и 00-05-64976).

## Список литературы

- [1] *Atmospheric remote sensing by microwave radiometry* / Ed. M.A. Janssen. New York: J. Wiley & Sons, 1993. Ch. 7.
- [2] *Solomonov S.V., Rozano S.B., Kropotkina E.P.* et al. // Proc. SPIE. 1998. V. 3406. P. 135-157.
- [3] *Esepkina N.A., Molodyakov C.A., Saenko I.I.* // Photonics and Optoelectronics. 1998. V. 5. N 2. P. 63-72.
- [4] *Есепкина Н.А., Зинченко И.И., Саенко И.И.* и др. / Изв. вузов. Радиофизика. 2000. Т. XLIII. № 11. С. 935-941.
- [5] *Соломонов С.В., Розанов С.Б., Кропоткина Е.П.* и др. // Радиотехн. и электрон. 2000. Т. 46. № 12. С. 1519-1525.
- [6] *Schieder R., Tolls V., Winnerwisser G.* // Exp. Astr. 1989.V. 1. P. 101-121.