

## Спектральные измерения нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в диапазоне 18-27 ГГц

М.Т. Смирнов<sup>1</sup>, В.П. Саворский<sup>1</sup>, С.В. Маречек<sup>1</sup>, С.Ю. Турыгин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, smirnov@ire.rssi.ru,

<sup>2</sup>СКБ ИРЭ РАН, tur@sdbireras.ru

*Целью данной работы было исследование возможностей получения экспериментальных данных о естественных вариациях спектральных характеристик нисходящего излучения атмосферы при различных метеоусловиях. В работе приводится краткое описание СВЧ радиометра-спектрометра диапазона 18-27 ГГц, позволяющего проводить измерения со спектральным разрешением 200 МГц в указанном диапазоне. Измерения проводились из окна лаборатории в Подмоскowie и с морской платформы, расположенной вблизи берега Крыма.*

*The main goal of this work was to study possibilities of obtaining experimental data on the natural variations of spectral characteristics of the downward atmospheric radiation under various meteorological conditions. This paper provides a brief description of the microwave radiometer-spectrometer in band 18-27 GHz, which allows measurements with a spectral resolution of 200 MHz in the specified range. The measurements were carried out from the window of a laboratory in the Moscow suburbs and offshore platforms located near the coast of Crimea.*

Знание тонкой спектральной структуры излучения вблизи линий поглощения атмосферных газов имеет большое значение для повышения точности восстановления высотных профилей соответствующих газовых составляющих атмосферы. Изменения формы спектральной линии несут информацию об изменениях этих высотных профилей.

Совершенствование техники измерений ведет к развитию гиперспектральных методов измерений, позволяющих исследовать спектральные особенности излучения различных объектов.

В данной работе исследовалось излучение атмосферы в линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц с захватом близлежащих окон прозрачности при помощи СВЧ радиометра спектрометра.

Целью проведенных экспериментов было исследование возможностей получения данных о естественных вариациях спектральных характеристик нисходящего излучения атмосферы при различных метеоусловиях. Измерения проводились из окна лаборатории в Подмоскowie и с морской платформы, расположенной вблизи берега Крыма.

### Радиометр-спектрометр P22M

СВЧ радиометр-спектрометр P22M построен по схеме приемника полной мощности и имеет высокоточную систему поддержания постоянной температуры ключевых элементов.

Измерительные каналы радиометра формируются с использованием супергетеродинного квадратурного преобразования. Верхняя и нижняя боковые полосы преобразуются в полосу промежуточных частот, и усиливаются двумя независимыми усилителями. Гетеродин выполнен с использованием синтезатора частот, управляемого с компьютера, что позволяет программно изменять частоты измерений в пределах рабочего диапазона.

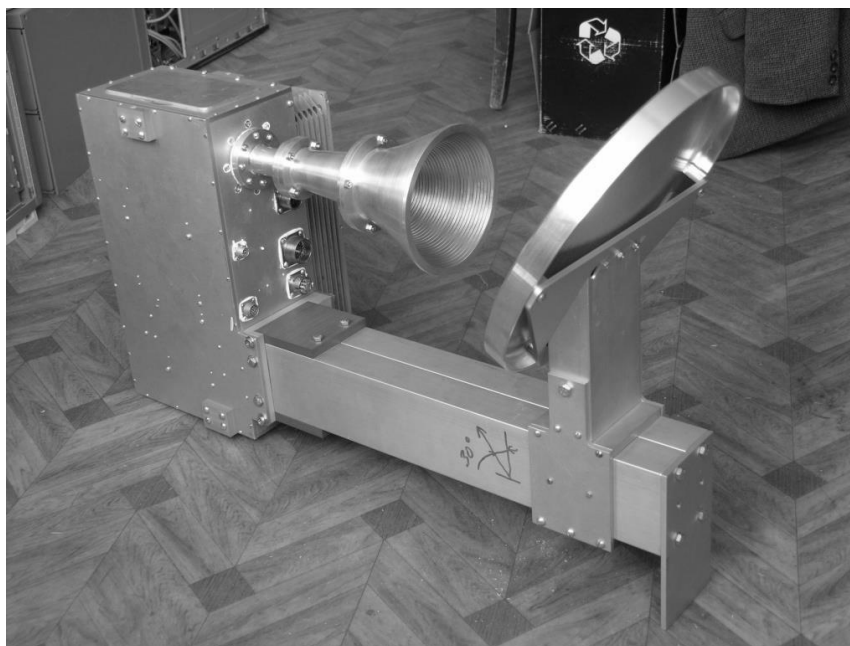
Прибор имеет следующие основные характеристики:

- рабочий диапазон частот от 18,0 до 27,2 ГГц,

- спектральное разрешение 200 МГц,
- чувствительность приемника 0,02 К в полосе частот 200 МГц,
- стабильность поддержания температуры ключевых элементов 0,002 К;

Рупорно-зеркальная антенна имеет большой КПД главного лепестка (порядка 98%) и малый уровень боковых лепестков (минус 40 дБ).

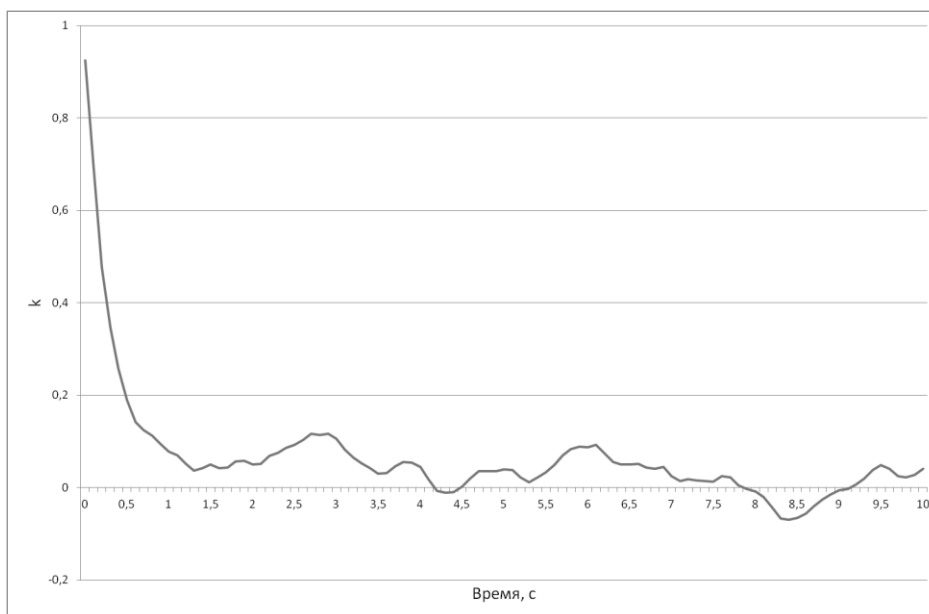
На рис. 1 представлена фотография внешнего вида СВЧ радиометра-спектрометра.



**Рис. 1. Внешний вид СВЧ радиометра-спектрометра P22M диапазона 18-27,2 ГГц**

Программа управления и сбора данных СВЧ радиометра-спектрометра P22M позволяет выбирать для измерений произвольный набор частот из фиксированного списка. Измерения на выбранных частотах производятся последовательно, циклически. Для ускорения процесса получения спектра измерения проводятся одновременно двумя разными приемниками на двух частотах, сдвинутых на 3,2 ГГц.

Получение полного спектра излучения требует затрат времени на проведение измерений на 31 рабочей частоте гетеродина. Наряду с накоплением сигнала для повышения точности измерений, при переключении частот требуется время порядка 0,15 с для завершения переходных процессов в элементах приемника. В качестве оптимальной постоянной времени для измерений была выбрана величина 0,3 с, которая определяется временем корреляции измеренных сигналов. На рис. 2 приведен пример автокорреляционной функции радиоярких температур ясного неба для частоты 21,2 ГГц при измерениях на внутренней тактовой частоте приемника без усреднения результатов. При этом время получения полного спектра составляет примерно 11 с.



**Рис. 2. Оценка автокорреляционной функции радиоярких температур ясного неба для частоты 21,2 ГГц при измерениях без усреднения результатов**

Калибровка радиометра проводилась в лабораторных условиях по черному телу, охлажденному жидким азотом, и ему же при комнатной температуре. Кроме того, при калибровке измерялись коэффициенты взаимного влияния каналов измерений с двумя разнесенными частотами.

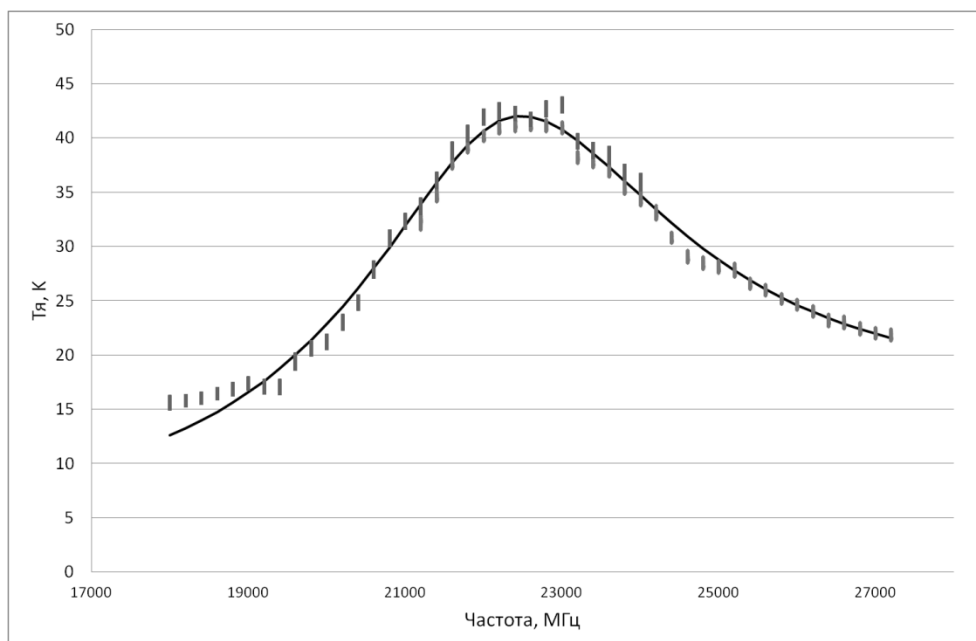
Одной из важных характеристик радиометра принято считать его флуктуационную чувствительность. Нами была оценена не эта величина, а интегральная характеристика  $\Delta T_{ин}$  включающая в себя не только шумы радиометра, но и естественные флуктуации излучения атмосферы на небольших интервалах времени. Эта величина лучше характеризует способность радиометра различать изменения в излучении, обусловленные вариациями интересующих нас профилей температуры и влажности атмосферы. Для оценки  $\Delta T_{ин}$  использовались измерения излучения безоблачной атмосферы длительностью 1-2 минуты. По результатам измерений при рабочей постоянной времени радиометра 0,3 с получена оценка  $\Delta T_{ин} = 0,1$  К.

### **Результаты измерений спектров излучения**

Измерения спектров нисходящего излучения атмосферы проводились, как правило, при фиксированных зенитных углах в течение достаточно длительного времени.

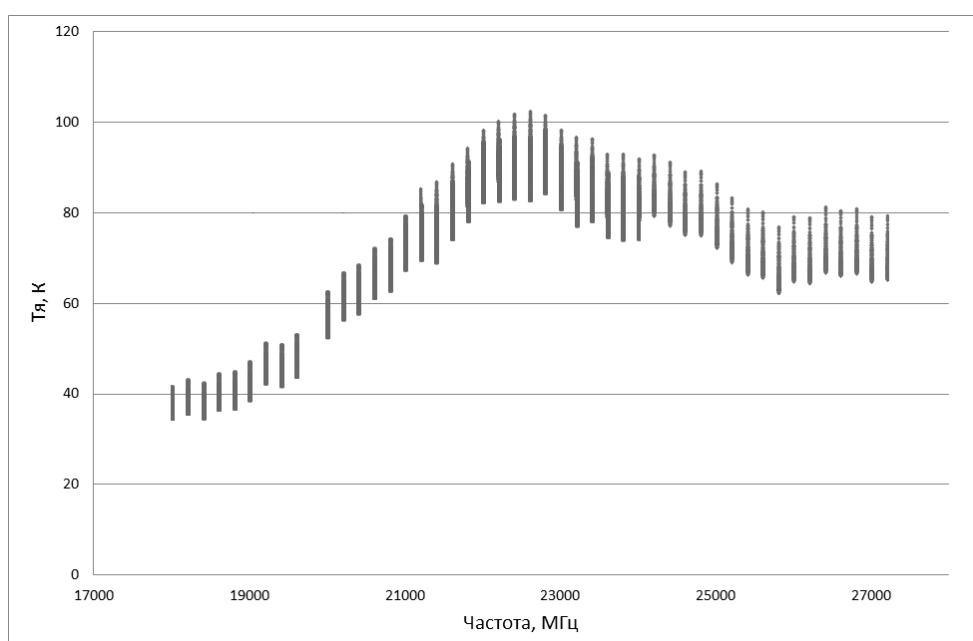
На рис. 3 представлен пример измерений спектра нисходящего излучения безоблачной атмосферы по результатам измерений в Подмоскowie. На рисунке четко виден характерный максимум излучения атмосферы, обусловленный линией поглощения водяного пара в области частот с центром на 22,235 ГГц. Там же на рисунке, для сравнения, приведены результаты модельных расчетов, полученных по при помощи комплекса программ ARTS [1], для среднеширотной модели атмосферы с подгонкой интегрального влагосодержания атмосферы под реальные условия.

Из рисунка видно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных спектров излучения атмосферы. Отклонения формы экспериментальной кривой от теоретической возможны из-за изменений реальных профилей температуры и влажности атмосферы по сравнению со среднеширотной моделью.



**Рис. 3. Результаты измерений спектра нисходящего излучения безоблачной атмосферы (27.05.16, Подмосковье, угол наблюдения  $25^\circ$  от зенита, сплошная линия – результаты модельных расчетов)**

На рис. 4 приведен пример семейства спектров излучения нисходящего излучения атмосферы при прохождении кучевых облаков средней мощности. Измерения в данном случае проводились под углом  $55^\circ$  от зенита в Крыму. Наличие облачности приводит к увеличению измеряемых радиоярких температур во всем диапазоне частот. Наблюдаемые вариации радиоярких температур при наличии облачности в низкочастотной области спектра меньше чем в высокочастотной. Кроме того, влияние линии поглощения водяного пара становится менее выраженным.



**Рис. 4. Спектры радиоярких температур нисходящего излучения атмосферы при наличии облачности (26.09.16, Крым, угол наблюдения  $55^\circ$  от зенита)**

## **Выводы**

СВЧ радиометр-спектрометр Р22М позволяет проводить измерения спектральных характеристик нисходящего излучения атмосферы с высокой точностью и достаточно высоким спектральным разрешением. Полученные результаты измерений позволяют оценить естественную изменчивость спектров излучения в зависимости от метеоусловий.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 16-07-00956 и Госзаданием «ЦОХКИ-1» – регистрационный номер – 01201354304.*

## **Литература**

1. Eriksson, P., S. A. Buehler, C. P. Davis, C. Emde, and O. Lemke, “ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, Version 2”, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, No 112, 1551–1558, 2011