

# СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ИНТЕГРАЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК В СОСТАВЕ ИНСТРУМЕНТА TELIS - ОПИСАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ В СУБТЕРАГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ

**Киселев О.С., Кошелец В.П.**

ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, [kiselev@hitech.cplire.ru](mailto:kiselev@hitech.cplire.ru),

Сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП), разработанный в ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН - супергетеродинный приемник, предназначенный для приема излучения в диапазоне 450 - 650 ГГц. СИП был использован в качестве одного из приемных элементов инструмента TELIS (Terahertz Limb Sounder), прибора, установленного на высотном аэростате, и предназначенного для исследования состава атмосферы в терагерцовом диапазоне в режиме наклонного сканирования. В данной работе представлено краткое описание инструмента TELIS, его приемных элементов, а также результаты нескольких успешных измерительных кампаний 2009-2014 годов, проведенных в приполярных областях.

## Введение

В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН был создан высокочувствительный сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) ТГц диапазона с собственной шумовой температурой 200 К в диапазоне 450 - 650 ГГц, обладающий габаритами и энергопотреблением, позволяющими использовать его на мобильной платформе. На микросхеме СИП размещены все элементы, необходимые для супергетеродинного приема сигналов: приемная антенна с СИС смесителем, сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ) и гармонический смеситель для фазовой стабилизации частоты СГГ. Фотография СИП представлена на рис.1.

Впервые СИП был использован в качестве спектрометра в рамках международного проекта TELIS (TErahertz LImb Sounder) – прибора для дистанционного исследования атмосферы с борта высотного аэростата в диапазоне 450 – 650 ГГц в режиме наклонного сканирования [1].

## Инструмент TELIS

Целью проекта TELIS, в котором участвовали DLR (аэрокосмическое агентство Германии, координатор проекта), RAL (Лаборатория Резерфорда Эпплтона, Великобритания), SRON (Институт космических исследований Нидерландов) совместно с ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, является спектрометрическое исследование состава атмосферы с борта стратосферного аэростата при помощи двух сверхпроводниковых приемников, интегрированных в один криостат.

Основной задачей инструмента TELIS (рис. 2) является исследование распределения концентрации атмосферных газов в зависимости от высоты. Полученные данные позволяют построить, а также уточнить существующие модели атмосферы, что в свою очередь дает лучшее понимание процессов, происходящих в ней. Измерения спектров проводились одновременно на частотах 490 – 650 ГГц (СИП) 1.8 ТГц (супергетеродинный приемник с НЕВ смесителем).

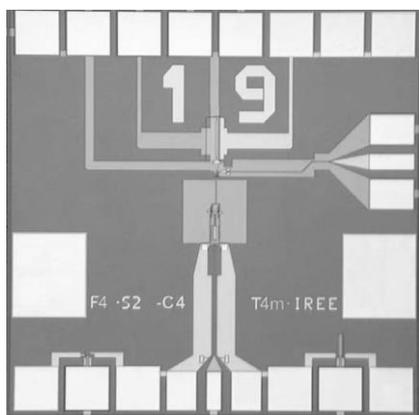


Рис. 1. Микросхема СИП.

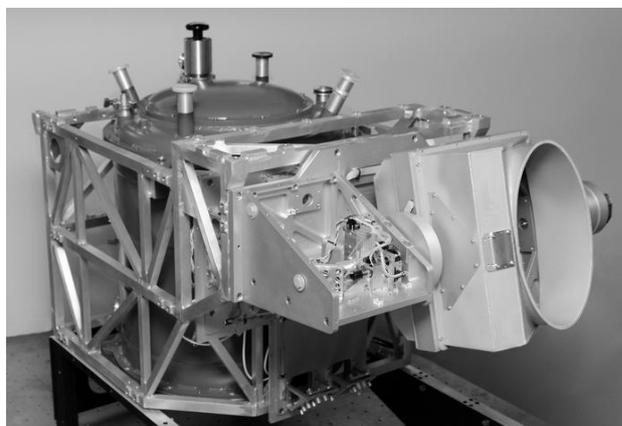


Рис. 2. Общий вид инструмента TELIS.

### Полетные кампании 2009-2014 годов

Итогом многолетней работы по созданию инструмента TELIS стали четыре успешных запуска, произведенные с полигона Esrange (находится в приполярной Швеции) в марте 2009, январе 2010, марте 2011 года, а также запуск с полигона города Timmins (Канада) в сентябре 2014 года. Инструмент располагался в гондole высотного аэростата совместно с инструментом MIPAS-B (разработка Института метеорологических исследований Карлсруэ, Германия).

За время полетов, самый короткий из которых продолжался 10 часов на рабочей высоте (около 35 км), были получены тысячи спектров атмосферных газов. Основной задачей запусков в северной Швеции было исследование каталитического разрушения озона в химических реакциях с участием соединений хлора и брома над Арктикой. На рисунках 3 и 4 представлены измеренные спектры основных реагирующих соединений – непосредственно озона, HCl и ClO в зависимости от высоты наблюдения. Полученные данные позволяют построить график распределения концентрации всех веществ от высоты с точностью, не хуже 10%. При том общее время измерений данных спектров составило 16 секунд для данных на рис.2 и 35 секунд для данных, изображенных на рисунке 3. Для достижения той же точности измерений с использованием полупроводниковых приемников того же частотного диапазона, шумовая температура которых не ниже 1800К, потребовалось бы на порядки больше времени. Другим важным преимуществом СИП является возможность быстрой перестройки его приемной частоты в широком диапазоне – от 450 до 650 ГГц, что позволяет производить измерений большого количества атмосферных газов практически одновременно.

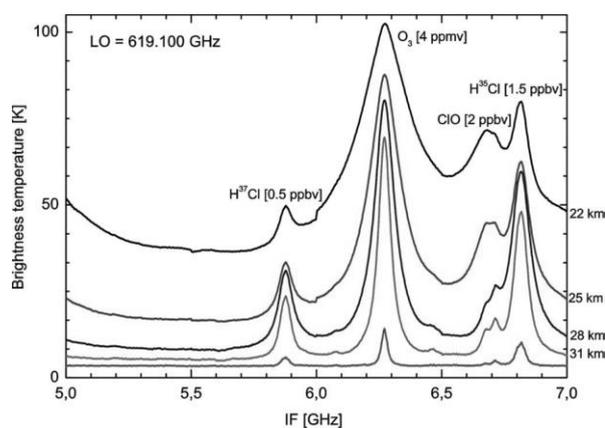


Рис. 3. Спектральные линии двух изотопов HCl, ClO и озона. Частота гетеродина – 619.1 ГГц. [2]

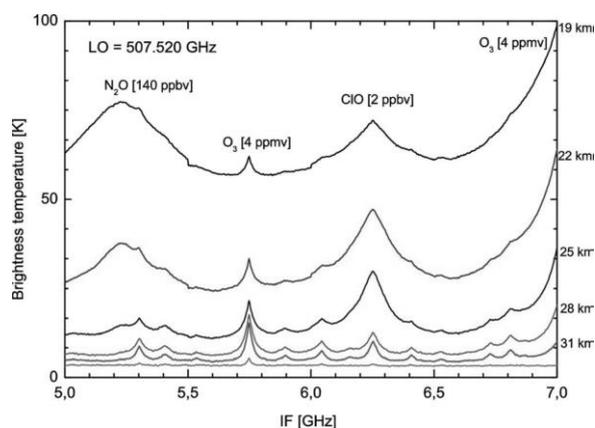


Рис. 4. Спектральные линии озона, ClO и N<sub>2</sub>O. Частота гетеродина – 507.52 ГГц. [2]

Научные результаты запусков инструмента TELIS представлены уже в нескольких журналах, посвященных химии атмосферы [3,4]. Тем не менее, процесс обработки данных, полученных во время полета инструмента, продолжается, равно как и послеполетные исследования инструмента, которые позволяют увеличить точность получаемых данных. Однако уже сейчас продемонстрирована возможность измерения концентрации некоторых газов при помощи СИП на уровне нескольких частиц на миллиард (1 ppt).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. O. Kiselev et al., “Balloon-borne superconducting integrated receiver for atmospheric research,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, no.3, pp. 612–615, Jun. 2011.
2. V.P. Koshelets et al, « Superconducting Integrated Terahertz Spectrometers», IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, vol. 5, pp 687- 694
3. de Lange et al., “HCl and ClO in activated arctic air; first retrieved vertical profiles from TELIS submillimetre limb spectra,” Atmos. Meas. Tech., vol. 5, pp. 487–500, Feb. 2012
4. Y. Kasai et al., “Validation of stratospheric and mesospheric ozone observed by SMILES from International Space Station,” Atmos. Meas. Tech., vol. 6, pp. 2311–2338, Sep. 2013.

Данная работа выполнена в рамках Соглашения с Минобрнауки РФ № 14.607.21.0100 (идентификатор проекта RFMEFI60714X0100).