

**Сверхпроводниковый интегральный приёмник субмиллиметрового  
диапазона**

Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., Киселев О.С., Кошелец В.П.,  
Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Филиппенко Л.В., Худченко А.В.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Arno de Lange, Gert de Lange, Pavel A. Yagoubov

Институт космических исследований Нидерландов (SRON)

В данной статье представлены результаты по разработке и успешному применению супергетеродинного интегрального приёмника, созданного на основе туннельных структур типа сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС). Концепция приёмника была предложена и разработана в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, а затем и успешно реализована в рамках совместного проекта TELIS (Terahertz Limb Sounder) с Институтом космических исследований Нидерландов (SRON). Международный проект TELIS направлен на исследование атмосферы Земли с борта высотного аэростата. В рабочем диапазоне приёмника 500-650 ГГц находятся спектральные линии многих соединений, в том числе

хлорсодержащих, регистрация которых является одной из важных задач экологического мониторинга атмосферы. При выполнении работ по созданию приёмника была разработана и оптимизирована технология изготовления СИС-переходов на основе трёхслойных структур Nb/AlN/NbN, что позволило получить низкую шумовую температуру приёмника, а также малую ширину линии излучения сверхпроводникового генератора гетеродина на основе распределённого джозефсоновского перехода. Во всём рабочем диапазоне приёмника была реализована возможность непрерывной перестройки частоты генерации гетеродина. В рамках проекта TELIS зимой 2009 года на полигоне Esrange в окрестностях города Кируна (Швеция) был произведён успешный запуск, который продемонстрировал возможность работы такого приёмника в качестве бортового устройства для мониторинга атмосферы.

## **Superconducting Integrated Submillimeter Receiver**

P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, N.V. Kinev, O.S. Kiselev, V.P. Koshelets, A.S.

Sobolev, M.Yu. Torgashin, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko

The Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Moscow, Russian  
Academy Science;

Arno de Lange, Gert de Lange, Pavel A. Yagoubov

SRON Netherlands Institute for Space Research

In this paper the results on the development and implementation of the fully superconducting integrated receiver (SIR) based on the Josephson SIS-junctions are presented. The idea of such receiver operating at 500-650GHz was suggested and developed in the Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics and then successfully implemented in project TELIS together with the SRON Netherlands Institute for Space Research. TELIS is a three-channel balloon-borne heterodyne spectrometer for atmospheric research. This range contains spectral lines of many contaminating substances including chlorine compounds, detection of them being one of the most important issues of the atmosphere monitoring. A new technological process for fabrication of Nb/AlN/NbN junction was successfully developed during spectrometer improvement. It allowed us considerably reduce the free running radiation linewidth of the superconducting local oscillator based on the long Josephson junction (so-called Flux-Flow

Oscillator) and decrease the receiver's noise temperature. At the same time continuous frequency tuning was made possible in the whole operating band. The first TELIS flight was made in Kiruna, Sweden, and proved the SIR to be a very promising balloon-borne device.

## **Введение**

Смесители на основе нелинейности туннельного тока квазичастиц в переходах сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) являются наиболее чувствительными приемными элементами во всем миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне волн (от 100 до 1000 ГГц), их чувствительность ограничена лишь квантовым пределом  $hf/2k$  [1, 2]. Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными природой элементов и криогенной рабочей температурой. Поскольку время накопления для приема сверхслабых сигналов и обнаружения сверхмалых концентраций веществ пропорционально квадрату шумовой температуры используемого приемника, приёмники на основе СИС-переходов позволяют значительно сократить время наблюдения.

В Институте радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН разработан уникальный сверхпроводниковый интегральный приёмник (СИП) диапазона 500-650 ГГц [3 - 7]. На микросхеме СИП размещаются приемная антенна, сверхпроводниковый генератор гетеродина (СГГ), СИС-смеситель с двумя туннельными переходами площадью  $0.8 \text{ мкм}^2$  каждый, а также гармонический СИС-смеситель (ГС), использующийся в системе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) для стабилизации частоты СГГ. При подаче лишь постоянного питания от батарей микросхема такого приемника работает как супергетеродинный приемник в субмм диапазоне волн, не требуя никакого громоздкого дополнительного СВЧ оборудования.

Приёмник предназначен для исследования распределения в атмосфере различных соединений (таких, как ClO, BrO, O<sub>3</sub>, HCl, HOCl, H<sub>2</sub>O и трех ее изотопов, HO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, HNO<sub>3</sub>, CH<sub>3</sub>Cl, HCN и многих других). Приемник работает в режиме лимбового зондирования с борта высотного аэростата, на сегодняшний день он успешно испытан в рамках проекта TELIS [8, 9].

### **Конструкция сверхпроводникового интегрального приёмника**

Принципиальная блок-схема приёмника для измерения спектрального распределения внешнего электромагнитного сигнала, показана на рис. 1, а фото микросхемы приёмника – на рис. 2 а и б (общий вид и центральная часть). На фотографии центральной части видны СГГ размером 400x16 мкм<sup>2</sup>, двойная дипольная антенна, СИС-смеситель с двумя переходами и ГС площадью примерно 1 мкм<sup>2</sup>.

Микросхема интегрального приёмника устанавливается на поверхности кремниевой линзы [5], закреплённой в специальном криогенном блоке, который обеспечивает охлаждение микросхемы вместе с окружающей её элементами и крепление платы с фильтрами. По этой плате передаются радиочастотные сигналы от микросхемы и задаются токи питания чипа. Поскольку СГГ крайне чувствителен к магнитному полю, необходимо экранирование микросхемы СИП. Криогенный блок представляет собой два концентрических цилиндра, обеспечивающих экранизацию от магнитного поля. Внешний цилиндр изготовлен из криоферрита, внутренний – из меди, покрытой слоем свинца толщиной 100 мкм, переходящим в

сверхпроводящее состояние. Фотографии разобранного криогенного блока, микросхемы приёмника на линзе, а также платы с установленным на неё приёмником, показаны на рис. 3а, б. Соединение контактов платы с контактами микросхемы осуществляется при помощи алюминиевых бондирующих проволок толщиной 25 мкм. Криогенный блок с платой и микросхемой приёмника помещается внутрь криостата, который наполняется жидким гелием. Таким образом, рабочая температура СИП и всех элементов, помещённых в криостат, составляет порядка 4,2К.

### **Результаты исследований СИП и его характеристики**

Шумовая температура интегрального приемника определялась из отношения сигнала на выходе приемника (Y-фактор), измеренного в режиме переключения горячей и холодной нагрузок. Её график в зависимости от частоты представлена на рис. 4. Лучшее значение температуры составляет порядка 130 К на частотах около 610 ГГц и 500 ГГц, а в области 570 ГГц наблюдается широкий пик, частично связанный с наличием линии поглощения воды, а также со свойствами настроечной структуры, интегрированной со смесителем. Однако, ни одна из исследуемых в рамках проекта TELIS частот не попала в данный интервал, поэтому эта особенность шумовой температуры не повлияла на качество измерений. Стоит отметить, что величина шумовой температуры приёмника практически не зависит от

тока смещения через СГГ, что даёт возможность в некотором диапазоне изменять этот ток в поисках рабочей точки с минимальной шириной линии генерации.

Для спектральных измерений важно, чтобы шумовая температура приемника была равномерна во всем диапазоне промежуточной частоты (ПЧ). Для этих целей были разработаны и включены в конструкцию микросхемы СИП элементы, согласующие СИС-смеситель с трактом ПЧ в широкой полосе (см. рис. 2а). Непосредственно на самом чипе размещены отстроечные емкости, которые, будучи расположенными до бондированного соединения, закорачивают на землю по переменному току отрезок копланарной линии, играющей роль отстраивающей индуктивности, включенной параллельно паразитной емкости СИС-смесителя и его согласующим структурам субмиллиметрового диапазона. Это, наряду с разделением копланарной линии на две секции, позволило увеличить ширину полосы ПЧ-тракта до 4 ГГц и добиться хорошей равномерности амплитудно-частотной характеристики тракта в диапазоне 4 - 8 ГГц. На рис. 5 показана ровная зависимость шумовой температуры от частоты ПЧ для СИП с ПЧ-трактом нового типа, частота СГГ при измерении была зафиксирована и равнялась около 600 ГГц.

Линия генерации сверхпроводникового генератора гетеродина с высокой степенью точности имеет лоренцеву форму [10]. Частота генерации однозначно связана с напряжением на генераторе при помощи соотношения Джозефсона. В автономном режиме стабильность СГГ определяется

низкочастотными наводками и медленными дрейфами в системе питания, а в режиме частотной стабилизации данные отклонения компенсируются за счет цепи обратной связи и спектр излучения СГГ имеет вид, представленный на рис. 6 (кривая 1). При включении системы фазовой синхронизации спектр излучения СГГ принимает вид, представленный на рис. 6 (кривая 2).

Одной из наиболее важных характеристик спектра фазово-синхронизированного СГГ является процент мощности, сосредоточенной в центральном пике – спектральное качество (СК). Часть спектра вне центрального пика называется фазовыми шумами. Чем уже ширина линии частотно синхронизированного СГГ, тем большая часть мощности попадает в полосу синхронизации системы ФАПЧ [11]. Для СГГ в составе интегрального приёмника в диапазоне частот 500-700 ГГц в режиме частотной стабилизации достигнута ширина линии от 9 до 2 МГц, что позволяет с помощью системы ФАПЧ в режиме фазовой синхронизации получить от 35 до 90 % мощности в центральном пике.

### **Система управления интегральным приёмником**

Для исследования таких сложных сверхпроводниковых структур как СИП и для управления его работой во время полета была создана многофункциональная автоматизированная система IRTECON (Integrated Receiver Test and Control) [12]. Модульная организация данной системы

позволяет легко её адаптировать для широкого круга исследовательских задач. Автоматизированная система включает в себя развитые библиотеки для управления измерительными приборами, визуализации экспериментальных данных, и математические алгоритмы для обработки результатов.

С точки зрения измерения и управления СИП является сложным прибором, состоящим из нескольких элементов. Дополнительные сложности управления обусловлены его высокой чувствительностью к шумам и наводкам, возможной невоспроизводимостью ВАХ СГГ и СИС при термоциклировании, сложностью управления в области ступенек Фиске. Задача управления СИП в полете заключается в постоянном мониторинге его состояния, возможной подстройке системы ФАПЧ, восстановлении режимов работы после сбоев. Была разработана комплексная методика определения основных характеристик СИП, процедуры поиска и многомерных оптимизаций его рабочих режимов для каждой выбранной частоты, а также устойчивые алгоритмы восстановления рабочих параметров СИП как для резонансного режима (ступени Фиске), так и для режима вязкого течения вихрей. В общей сложности оптимизируется до десяти параметров управления СИП. Вся информация записывается в базу данных и используется для выставления рабочих режимов приемника в реальных измерениях.

## Цели и результаты научного полёта TELIS

В марте 2009 года в Кируне (северная Швеция) сверхпроводниковый интегральный приёмник был впервые успешно запущен на борту аэростата TELIS (рис. 7). СИП проработал на высоте порядка 30 км более 10 часов в непрерывном режиме измерений, измерения проводились на 8 выбранных заранее частотах. В результате было получено очень много новых научных результатов, часть из них до сих пор находятся в стадии расчётов и обработки.

Научными задачами запуска являлись измерение изотопов воды и исследование каталитического разрушения озонового слоя химическими соединениями хлора и брома. Во время полёта были исследованы три изотопа воды: основной изотоп  $\text{H}_2^{16}\text{O}$  и два редких изотопа –  $\text{HDO}$  и  $\text{H}_2^{18}\text{O}$ . Скорости химических реакций и фазовых переходов различны для разных изотопов. Зная относительное содержание изотопов, можно понять суть различных сложных процессов, происходящих в атмосфере.

Различные соединения хлора могут каталитически разрушать озоновый слой. Такое разрушение озона особенно велико весной в арктических районах, когда прекращаются так называемые полярные вихри. В результате радикал  $\text{ClO}$  в заметных концентрациях становятся активными. Этот радикал имеет относительно маленькое время жизни, для его образования необходимо солнечное излучение. Это приводит к ежедневным циклическим изменениям его концентрации. На рис. 8 показаны линии  $\text{ClO}$ , которые были

измерены во время восхода Солнца. Видно, что концентрация ClO действительно увеличивается со временем. Во время полёта TELIS были исследованы ClO, NOCl и HCl, и результаты этих измерений наложат некоторые ограничения на скорости химических реакций в моделях атмосферы. В разрушении озонового слоя бром ещё более активен, чем хлор, но он содержится в гораздо меньших концентрациях. Линии радикала BrO в общем спектре очень слабые, поэтому требуется большое время интегрирования, чтобы можно было выделить эти линии из общего шума. В настоящее время записанные спектры BrO находятся в стадии обработки.

### **Заключение**

Сверхпроводниковый интегральный приёмник частотного диапазона 500-650 ГГц был успешно применён в проекте по исследованию атмосферы Земли, при этом было получено спектральное разрешение порядка 1 МГц. Шумовая температура приёмника составила менее 130 К в режиме фазовой автоподстройки частоты сверхпроводникового генератора гетеродина, диапазон промежуточных частот 4-8 ГГц. Для удалённого компьютерного управления приёмником были разработаны специальные процедуры, которые были протестированы во время полёта TELIS. Таким образом, продемонстрирована возможность работы такого приёмника в качестве бортового устройства летательного аппарата.

Имеются и другие возможности успешного применения интегрального приёмника. Аналитические линии поглощения наиболее актуальных объектов медицинской диагностики лежат в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Массовое производство относительно недорогих приёмников субмиллиметрового диапазона открывает принципиально новые возможности по их применению в медицине для анализа выдыхаемого воздуха. В данный момент ведутся работы по разработке методов анализа многокомпонентных газовых смесей на основе микроволновой газовой нестационарной спектроскопии и их внедрению в медицинскую диагностику. Также ведутся работы по расширению рабочего частотного диапазона, в том числе в область более низких частот, что позволит использовать приёмник в качестве наземного приёмного устройства для радиоастрономической обсерватории в Китае.

Данная работа поддержана проектами РФФИ № 09-02-00246 и 09-02-12172-офи\_м, грантом Президента России для ведущих научных школ НШ-5408.2008.2, а также программой фундаментальных исследований ОФН РАН «Проблемы радиофизики».

## Список цитируемой литературы

- [1] Tucker J.R., Feldman M.J. Quantum detection at millimeter wavelengths. *Rev. Mod. Phys.*, 1985, v. 4, pp. 1055-1113.
- [2] J. Zmuidzinis, P. Richards, "Superconducting detectors and mixers for millimeter and submillimeter astrophysics", *Proc. of the IEEE*, vol.92, No.10, October 2004, pp. 1597-1616
- [3] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, L.V. Filippenko, A.M. Baryshev, H. Golstein, T. de Graauw, W. Luinge, H. Schaeffer, H. van de Stadt "First Implementation of a Superconducting Integrated Receiver at 450 GHz"; *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 68, No. 9, pp. 1273-1275 (February 1996).
- [4] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, "Integrated Superconducting Receivers", *Superconductor Science and Technology*, vol 13, pp. R53-R69, (2000)
- [5] V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.B. Ermakov, O.V. Koryukin, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, M. Yu. Torgashin, P. Yagoubov, R. Hoogeveen, O.M. Pylypenko, "Superconducting Integrated Receiver for TELIS", "IEEE Trans. on Appl. Supercond.", vol. 15, pp. 960-963, 2005
- [6] В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко, "Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы", *Известия ВУЗов "Радиофизика"*, Том XLVIII, № 10–11, стр. 947-954, 2005.
- [7] В.П. Кошелец, Л.В. Филиппенко, В.Б. Борисов, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, О. С. Киселёв, И.Л. Лапицкая, А.С. Соболев, М.Ю. Торгашин, А. В. Худченко, П.А. Ягубов, "Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмиллиметрового диапазона длин волн для атмосферных исследований", *Известия ВУЗов "Радиофизика"*, Том L, № 10-11, стр. 935-940, 2007.
- [8] R.W.M. Hoogeveen, P.A. Yagoubov, A. de Lange, A.M. Selig, V.P. Koshelets, B.N. Ellison and M. Birk, "Superconducting Integrated Receiver development for TELIS", presented at the 12th International Symposium on Remote Sensing, 19-22 September 2005, Bruges, Belgium. *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX*; Roland Meynart, Steven P. Neeck, Haruhisa Shimoda; Eds., *Proc. of SPIE*, vol. 5978 (2005), p. 440-450
- [9] R.W.M. Hoogeveen, P.A. Yagoubov, G. de Lange, A. de Lange, V. Koshelets, M. Birk, B. Ellison, "Balloon borne heterodyne stratospheric limb sounder TELIS ready for flight", presented at the SPIE European Remote Sensing Conference 2007 in Florence,

- September 2007; SPIE European Remote Sensing Conference, Proceedings of SPIE, 6744, 67441U-1- 67441U-10, 2007.
- [10] V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, A.S. Sobolev, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind, *Superconductor Science and Technology*, v. 14, pp. 1040 - 1043, (2001)
- [11] V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, V.V. Kurin, A.L. Pankratov, J. Mygind, "Optimization of the Phase-Locked Flux-Flow Oscillator for the Submm Integrated Receiver", "IEEE Trans. on Appl. Supercond.", vol. 15, pp. 964-967, 2005.
- [12] A.B. Ermakov, S.V. Shitov, A.M. Baryshev, V.P. Koshelets, W. Luinge, "A data acquisition system for test and control of superconducting integrated receivers", *Applied Superconductivity Conference ASC'2000*, September (2000), Report 4EA10, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, v.11, No 1, pp. 840-843, (2001).
- [13] Valery P. Koshelets, Andrey B. Ermakov, Pavel N. Dmitriev, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, "Phase-locked Local Oscillator for Superconducting Integrated Receiver", presented at the 19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08), Groningen, the Netherlands, April 2008, report 7-5; published in the Proceedings of the ISSTT-08.
- [14] Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Ruud W.M. Hoogeveen, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Oleg S. Kiselev, Valery P. Koshelets, Arno de Lange, Gert de Lange, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, Wolfgang Wild, and Pavel A. Yagoubov, "Development and Characterization of the Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS", *SUST*, 2009, will be published.

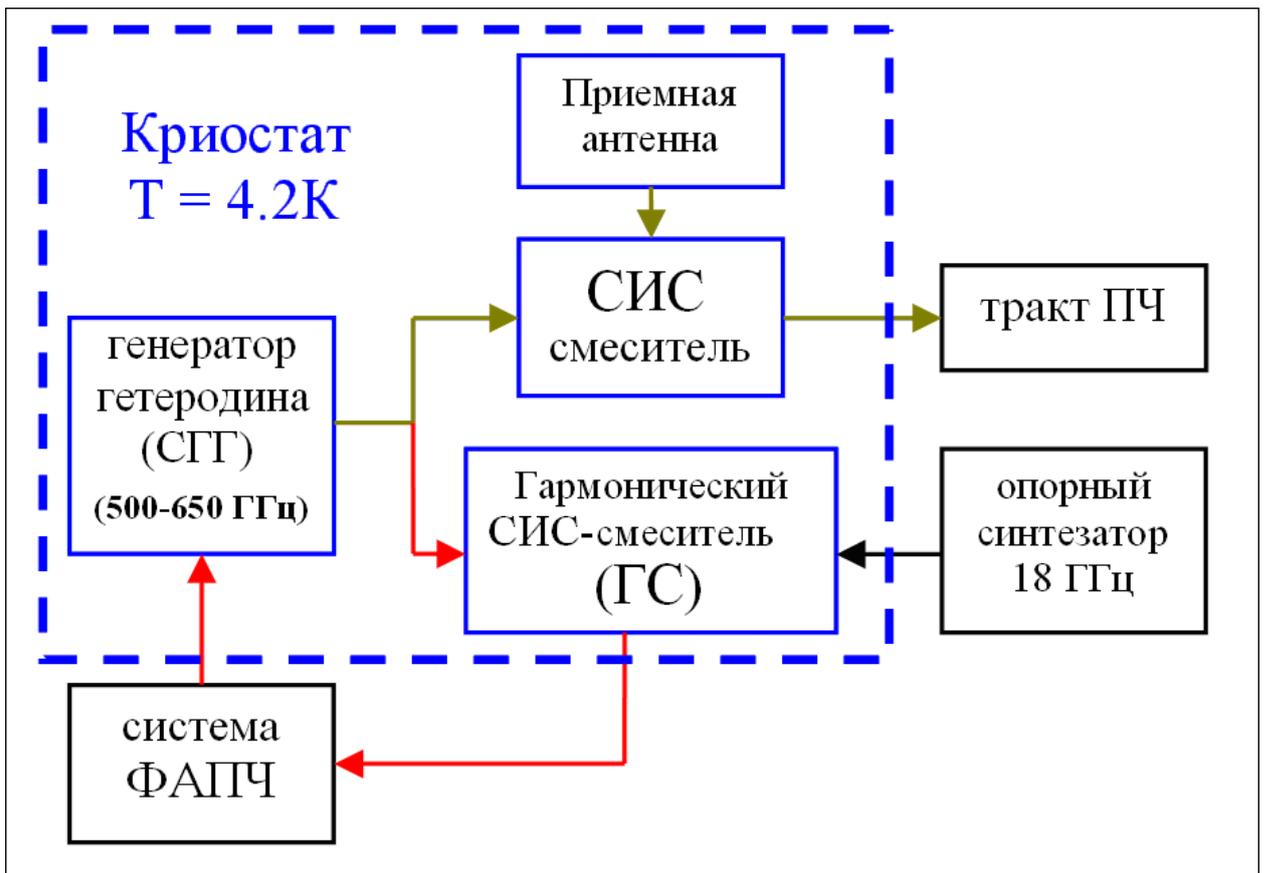
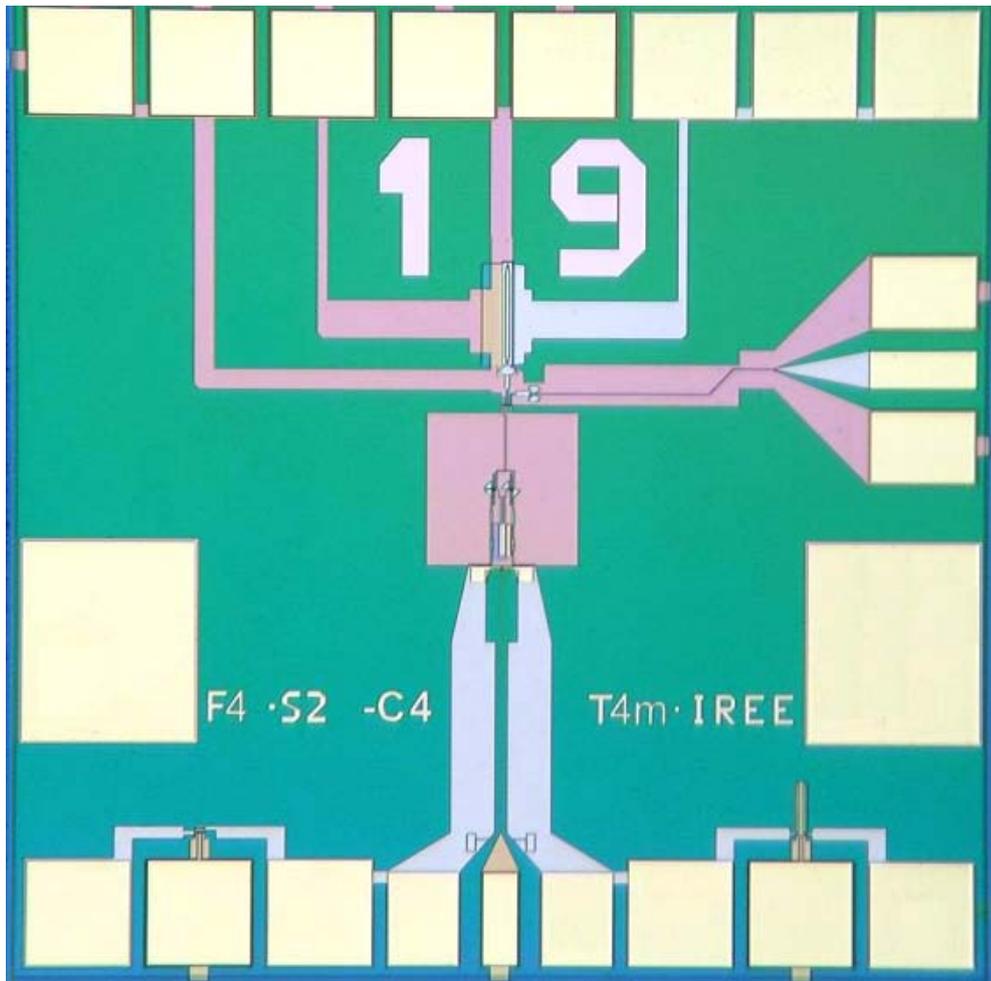
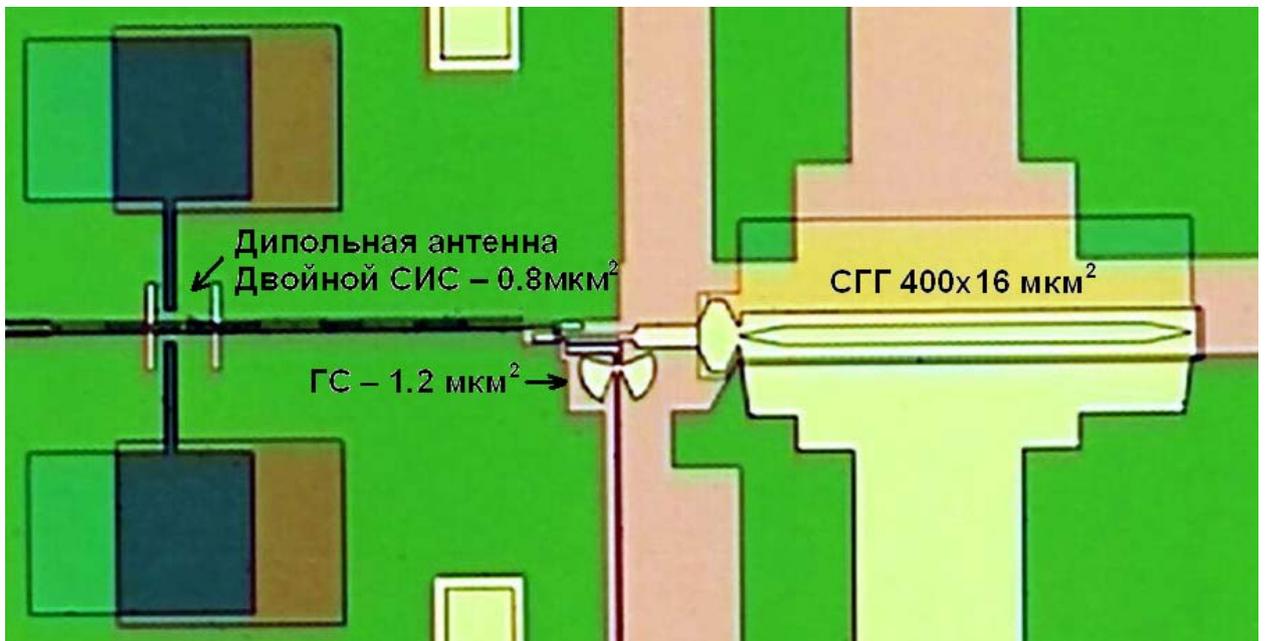


Рис. 1. Упрощённая схема сверхпроводникового интегрального приёмника.

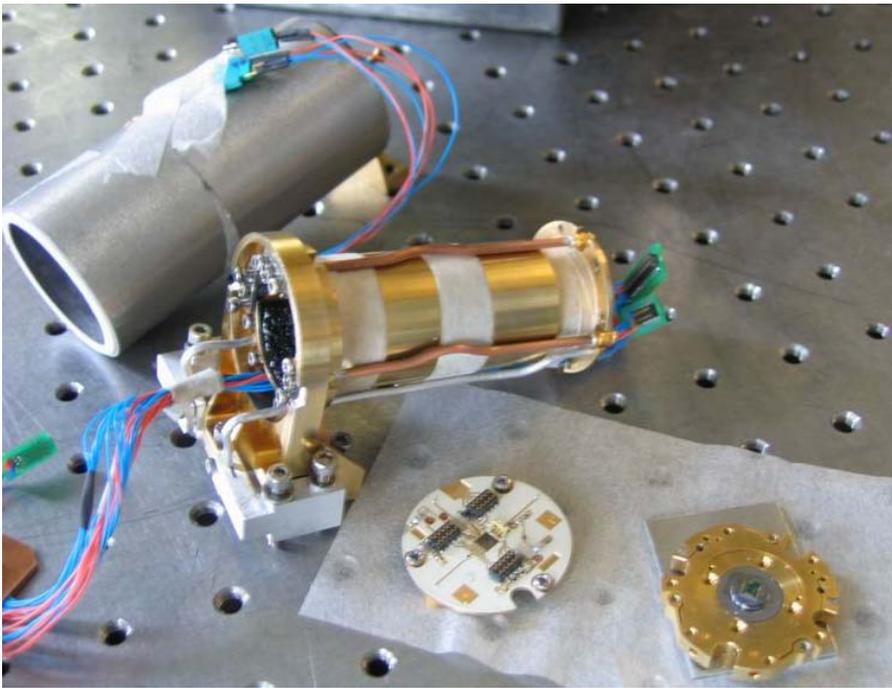


а)

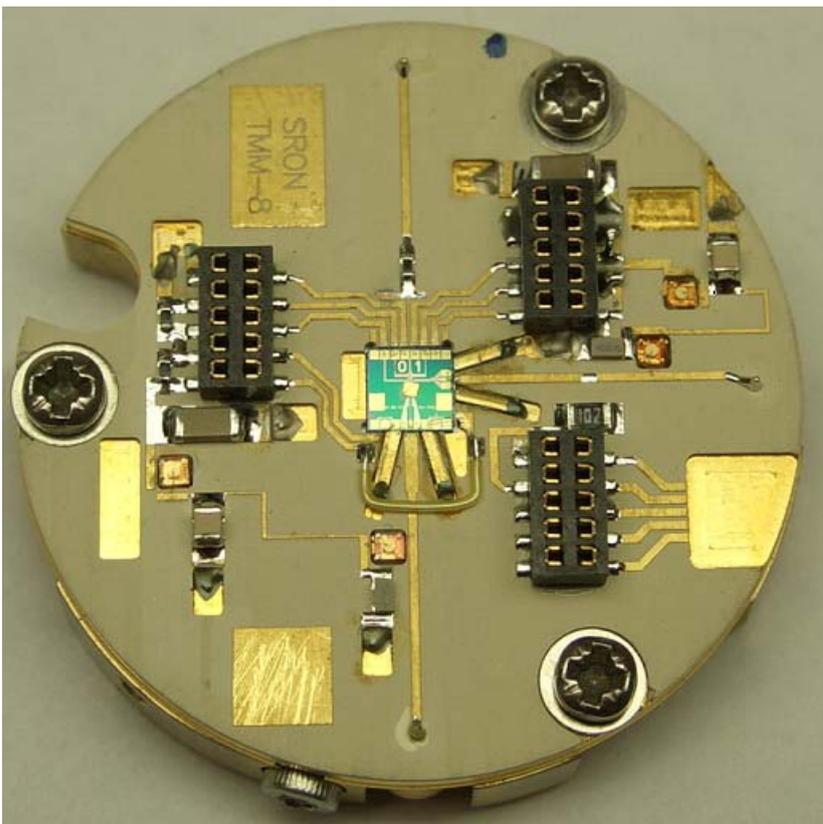


б)

Рис. 2. Фотография микросхемы сверхпроводящего интегрального приёмника (а) и микрофотография центральной части СИП с двойной дипольной антенной (б) [13].



(a)



(б)

Рис. 3. Фотография криогенного блока, платы смещения и микросхемы СИП, установленного на кремниевую линзу (а), а также фотография приёмника на линзе, смонтированного на плату смещения (б) [7].

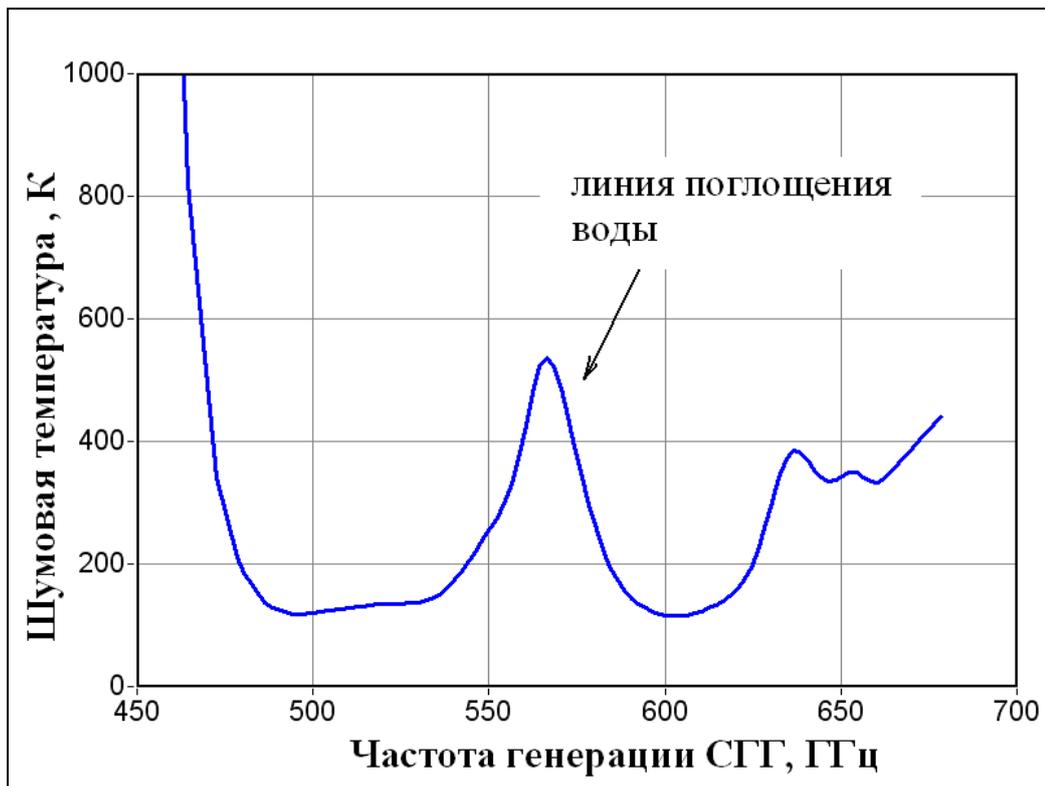


Рис. 4. Шумовая температура приёмника, измеренная в двухполосном режиме в полосе промежуточной частоты (ПЧ) 4 - 8 ГГц [14].

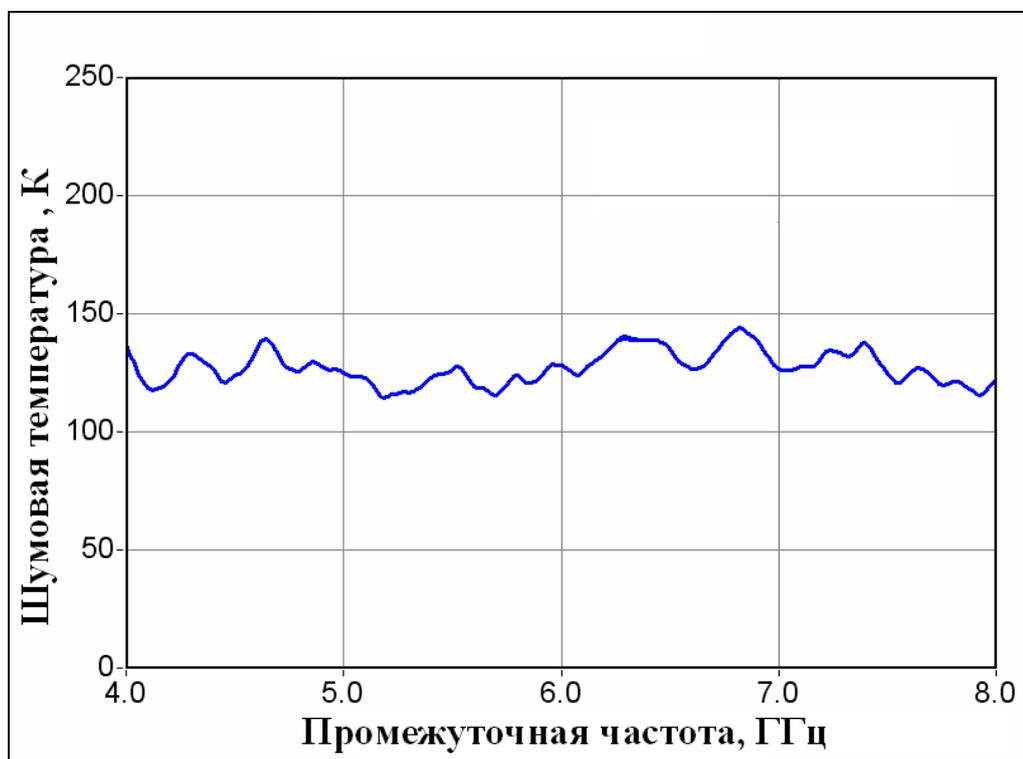


Рис. 5. Зависимость шумовой температуры от частоты ПЧ-тракта [14].

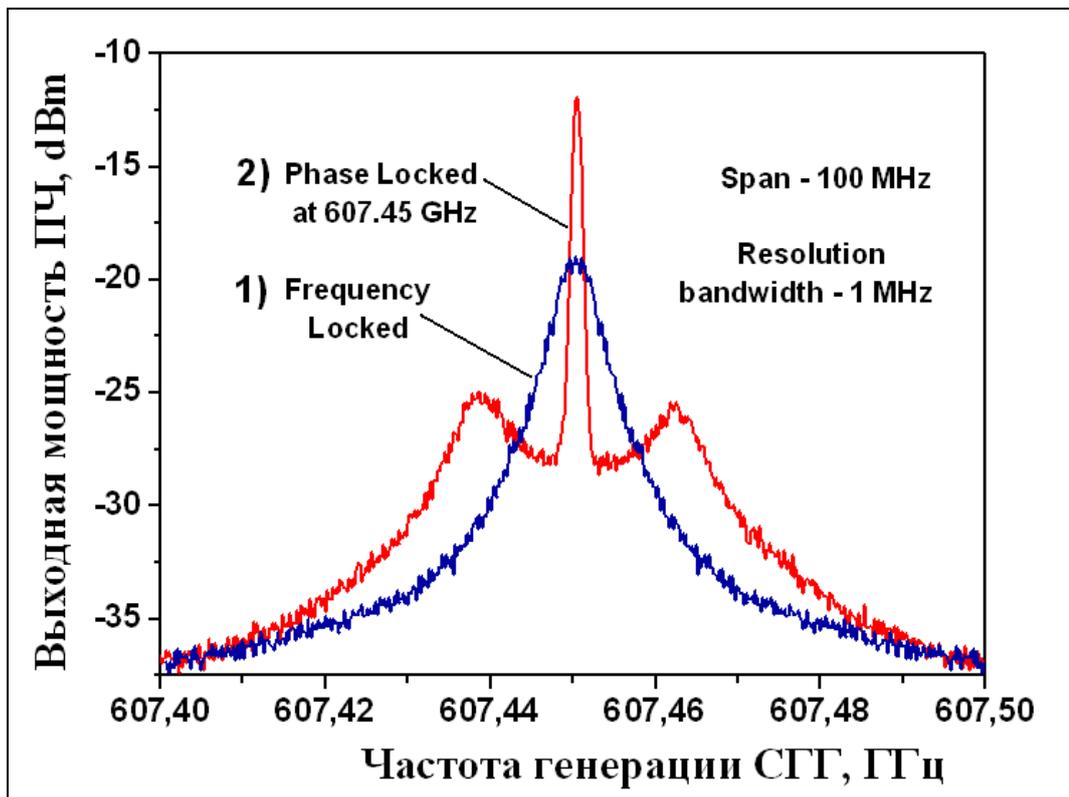


Рис.6. Экспериментально измеренные спектры излучения СГГ в режимах частотной стабилизации (кривая 1) и фазовой синхронизации (кривая 2).



Рис.7. Фотография испытательного полёта TELIS в Швеции, г. Кируна, февраль 2009г.

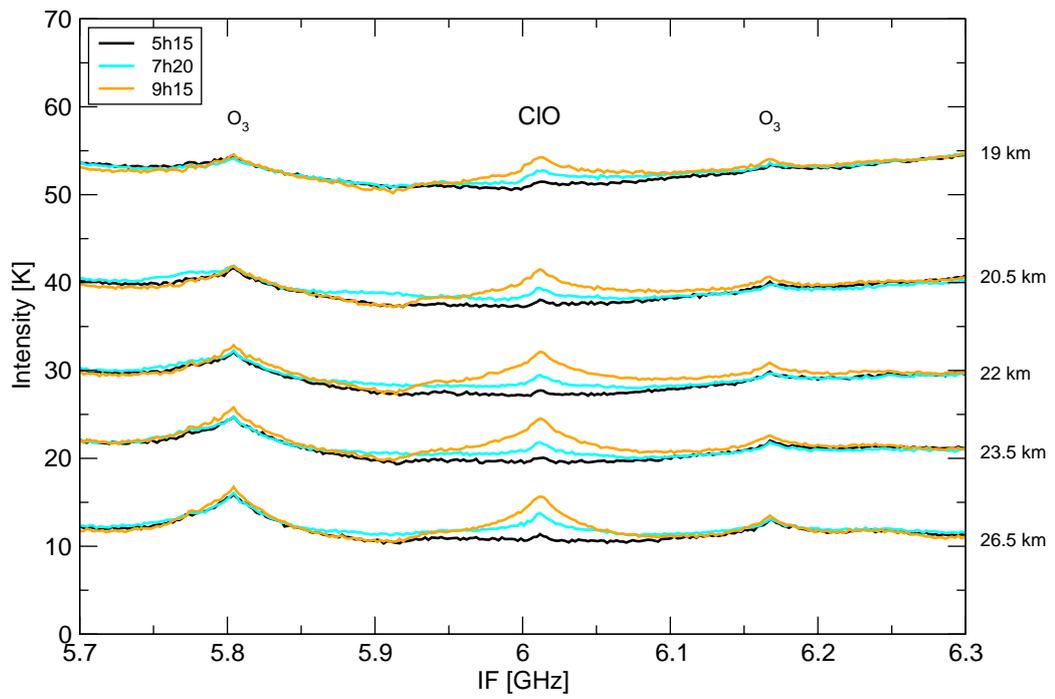


Рис.8. Концентрация ClO в дневном цикле, измеренная в режиме лимбового сканирования [14]. Спектры записаны во время полёта TELIS в Кируне, Швеция. Концентрации ClO явно возрастают после восхода Солнца.