

УДК 621.382.2

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРЫ

*В. П. Кошелец, П. Н. Дмитриев, А. Б. Ермаков, Л. В. Филиппенко, О. В. Корюкин,
М. Ю. Торгашин, А. В. Худченко*

Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва, Россия

В статье изложены результаты исследования сверхпроводниковых интегральных приёмных устройств субмиллиметрового диапазона длин волн, предназначенных для мониторинга атмосферы Земли с борта высотного аэростата. Была разработана, изготовлена и успешно испытана микросхема интегрального сверхпроводникового спектрометра с генератором гетеродина на основе распределённого джозефсоновского перехода, работающего в режиме вязкого течения вихрей. На частоте 650 ГГц измерена шумовая температура приёмника, которая составила менее 200 К, продемонстрирована возможность фазовой синхронизации частоты (ФАПЧ) сверхпроводникового генератора гетеродина и опорного синтезатора, что является принципиальным для работы спектрометра. Для обеспечения независимой работы бортового спектрометра в режиме фазовой синхронизации был разработан и испытан ряд новых устройств, создана автоматизированная программа для управления и оптимизации режимов работы приёмника с системой ФАПЧ. Были спроектированы, изготовлены и исследованы новые модификации сверхпроводникового генератора гетеродина, проведена оптимизация его топологии для работы в составе интегрального спектрометра. С помощью специально разработанной методики детально исследованы ширина и форма линии излучения генератора на частотах до 700 ГГц. В диапазоне частот от 500 до 700 ГГц была достигнута ширина линии излучения от 9 до 2 МГц соответственно, что позволяет синхронизовать от 35 до 90 % мощности генератора гетеродина. Исследовано влияние неидеальности линии излучения сверхпроводникового генератора гетеродина на процесс восстановления спектров газов в атмосфере.

ВВЕДЕНИЕ

Для дистанционного мониторинга земной атмосферы с использованием авиации, аэростатов и спутников, когда существенными требованиями являются малый вес, небольшое энергопотребление и ограниченный объём устройств, жизненно важным является разработка лёгких и компактных сверхчувствительных приёмников. Несколько лет тому назад в ИРЭ РАН была предложена и экспериментально апробирована концепция полностью сверхпроводникового интегрального приёмника субмиллиметровых волн [1–3]. В единой микросхеме приёмника интегрированы квантовый смеситель на основе квазичастичной нелинейности перехода сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС-перехода), планарная сверхпроводниковая приёмная антенна, криогенный генератор гетеродина (flux flow oscillator, FFO) [4, 5] и гармонический СИС-смеситель для стабилизации частоты этого генератора [6]. При подаче лишь постоянного питания от батарей эта микросхема работает как супергетеродинный приёмник в субмиллиметровом диапазоне длин волн, не требуя никакого дополнительного СВЧ оборудования.

Ранее нами был разработан и испытан интегральный спектрометр для частот порядка 350 ГГц, в котором частота генератора гетеродина синхронизована широкополосной системой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Для демонстрации спектрального разрешения интегрального приёмника с системой ФАПЧ гетеродина был измерен спектр стабильного источника сигнала на частоте 365 ГГц. В качестве источника сигнала был использован гармонический умножитель, питаемый синтезатором. Полученные данные доказали, что разрешение приёмника с системой ФАПЧ лучше 10 кГц [7]. Это удовлетворяет требованиям всех известных практических применений. С помощью этого приёмника были измерены спектры поглощения молекулы SO₂ при

различном давлении газа в кювете [8]. Однако гетеродин этого приёмника работал в резонансном режиме, поэтому его частота перестраивалась только вдоль ступеней Фиске, не обеспечивая полного частотного покрытия и непрерывности перестройки.

В данной статье приведены результаты разработки интегрального спектрометра диапазона $550 \div 650$ ГГц, предназначенного для исследований атмосферы Земли в режиме наклонного зондирования с борта высотного аэростата (проект Terahertz Limb Sounder, TELIS) [9]. Этот прибор разрабатывается совместно с Институтом космических исследований Нидерландов, первый испытательный полёт предполагается провести в конце 2006 года.

1. КОНСТРУКЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЁМНИКА

Сверхпроводниковый интегральный приёмник для проекта TELIS объединяет на одной микросхеме с размерами $4 \times 4 \times 0,5$ мм (фото центральной части микросхемы представлено на рис. 1) малошумящий СИС-смеситель с квазиоптической антенной, сверхпроводниковый генератор на потоке джозефсоновских вихрей (FFO), использующийся в качестве гетеродина, и гармонический смеситель (ГС) для фазовой стабилизации частоты этого генератора.

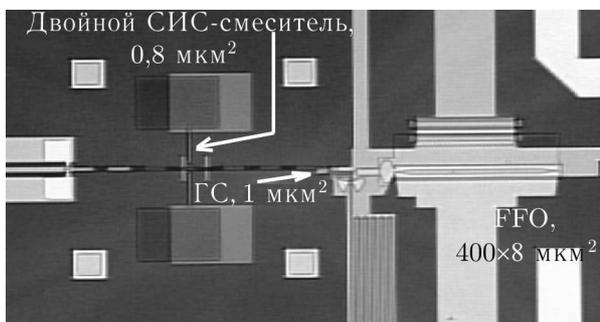


Рис. 1. Микрофотография центральной части микросхемы сверхпроводящего интегрального приёмника. Показаны основные элементы интегрального приёмника: смеситель с двумя СИС-переходами, двойная дипольная антенна, генератор гетеродина (FFO) и гармонический смеситель. Часть разводки и контактные площадки находятся за пределами кадра. Размер видимой части приблизительно $1,5 \times 1$ мм

Сверхпроводниковый генератор гетеродина представляет собой длинный джозефсоновский переход, в котором приложенное магнитное поле и ток смещения создают однонаправленный поток флаксонов. Скорость и плотность потока флаксонов и, следовательно, мощность и частота излучаемого сигнала могут настраиваться независимо совместной подстройкой токов смещения и магнитного поля. Микросхемы сверхпроводниковых интегральных приёмников для квазиоптических смесительных элементов изготавливаются из высококачественных трёхслойных структур Nb-AlO_x-Nb на подложке из кремния. Для достижения требуемой мгновенной полосы от 550 до 650 ГГц был использован двойной СИС-смеситель с переходами площадью $0,8 \text{ мкм}^2$. Генератор гетеродина соединяется со смесительным элементом, расположенным внутри двойной дипольной или двойной щелевой антенны, с помощью микрополосковой линии, содержащей согласующие

СВЧ структуры и развязки по постоянному току. Как FFO, так и СИС-смеситель имеют интегральные управляющие линии, с помощью которых задаются локальные магнитные поля. Для уменьшения влияния магнитного поля СИС-смесителя на генератор гетеродина линия управления смесителя имеет П-образную форму и расположена перпендикулярно FFO, что обеспечивает относительный уровень паразитного магнитного поля не более 10^{-3} .

Микросхема приёмника размещается на плоской задней поверхности кремниевой линзы, имеющей форму усечённого эллипса; антенна располагается на плоской поверхности в сечении дальнего фокуса (диаметр линзы в этом сечении 10 мм). В случае двойной дипольной антенны для получения высокой эффективности и хорошей симметрии луча на микросхему устанавливается дополнительный четвертьволновой отражатель (контр-рефлектор). Форма и размеры линзы были оптимизированы для получения минимального размера пучка на расстоянии 100 мм от

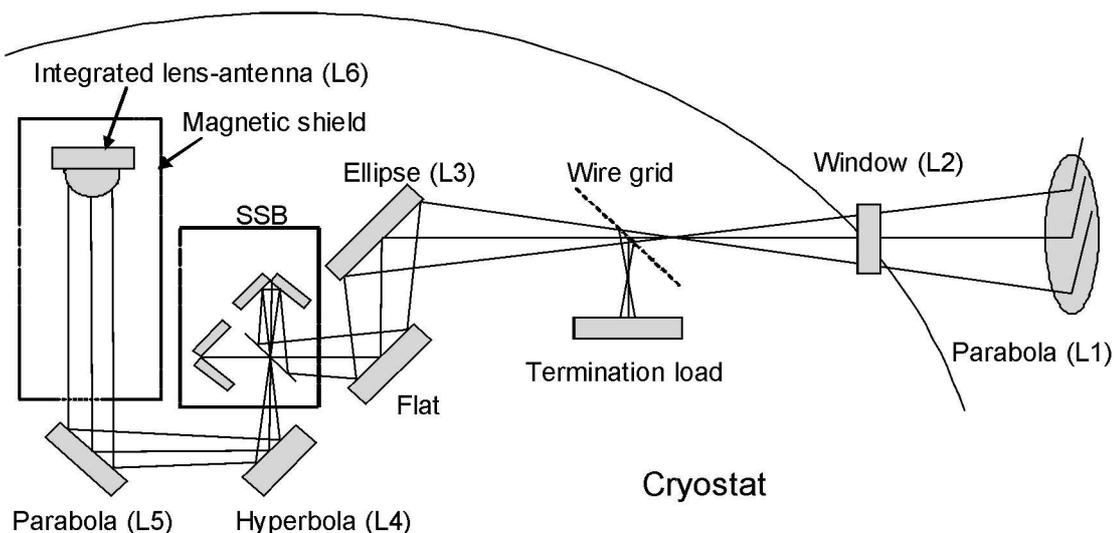


Рис. 2. Схема криогенной части оптической системы интегрального приёмника [9]

линзы для частот $550 \div 650$ ГГц, чтобы магнитный экран не обрезал принимаемый луч. Для минимизации отражений на границе линзы её изогнутая поверхность покрыта просветляющим слоем «Stycast» с толщиной 74 мкм (оптимальная толщина для частоты 600 ГГц).

Схема криогенной части оптической системы интегрального приёмника из работы [10] показана на рис. 2. Входной сигнал подаётся на приёмник через инфракрасный фильтр и проходит через однополосный (SSB) фильтр на основе интерферометра Мартина–Паплетта. Нежелательная боковая полоса принимаемого сигнала отражается двумя проволочными сетками и поглощается в холодной нагрузке (с температурой 4,2 К). Для уменьшения влияния внешнего магнитного поля на чувствительный FFO смесительный блок защищён двумя коаксиальными экранами. Внешний экран изготовлен из криопермаллоя, а внутренний — из меди, покрытой слоем электролитически осаждённого сверхпроводящего свинца толщиной 100 мкм. Микросхема сверхпроводникового интегрального приёмника размещается достаточно далеко от входного отверстия в экранах — единой апертуры для ввода излучения и подвода питания. Все компоненты приёмника устанавливаются на общую холодную пластину (с температурой 4,2 К). Весь приёмный блок с размерами $240 \times 180 \times 80$ мм будет заранее отъюстирован и протестирован перед установкой в систему TELIS.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИЁМНИКА

Ниже представлены предварительные результаты измерений характеристик сверхпроводникового интегрального приёмника на основе микросхем нового дизайна. В этой разработке за счёт изменения конструкции связующей схемы и уменьшения размеров гармонического смесителя были преодолены некоторые недостатки, присущие предыдущим вариантам микросхемы сверхпроводникового приёмника. Дополнительный набор фотомасок и оптимизация технологических режимов дали возможность изготавливать СИС-смесители субмикронного размера. В результате приемлемый уровень накачки как СИС-смесителя, так и гармонического смесителя был реализован в диапазоне частот $500 \div 650$ ГГц (см. рис. 3). Отметим, что для оптимальной работы СИС-смесителя требуется накачка порядка $20 \div 25$ % от скачка тока на щели туннельного перехода (I_g). Для гармонического смесителя накачкой служит сигнал синтезатора, а мощность, приходящая от FFO, является полезным сигналом. Поэтому уровень мощности FFO, необходимый для работы гармонического смесителя с достаточно высоким отношением сигнал/шум не превышает

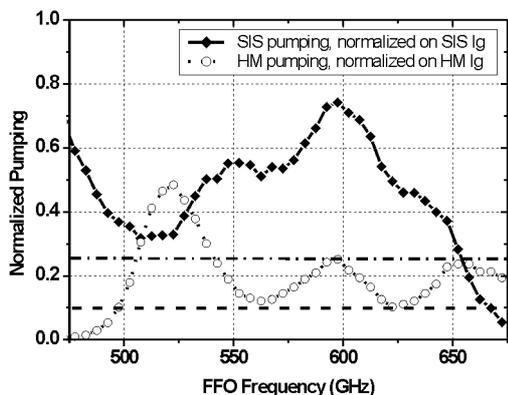


Рис. 3. Ток накачки СИС-смесителя и гармонического смесителя в зависимости от частоты, нормированный на скачок тока на щели туннельного перехода соответственно СИС-смесителя и гармонического смесителя ($I_{g\text{СИС}} = 105 \text{ мкА}$, $I_{g\text{ГС}} = 81 \text{ мкА}$). Штрихпунктиром показан уровень 25 %, достаточный для работы СИС-смесителя; уровень 10 %, приемлемый для гармонического смесителя, показан штриховой линией [10]

5 ÷ 10 % от I_g [11]. Значительное превышение этого уровня на некоторых частотах не является проблемой, поскольку гармонический смеситель работает в сильно нелинейном режиме и информация содержится в частоте (а не в амплитуде) преобразованного сигнала.

Шумовая температура приёмника определялась из отношения уровней сигнала на выходе приёмника (Y -фактор) в режиме переключения горячей и холодной нагрузок (см. рис. 4). Данные были получены с помощью модернизированной версии программы IRTECON (Integrated Receiver TEst and CONtrol) [13]. Мы использовали модулятор холодной (77 К) и горячей (300 К) нагрузок (частота переключения 11 Гц), перестраиваемый фильтр промежуточной частоты (с полосой порядка 40 МГц) и быстрый измеритель мощности. Процедура измерения Y -фактора в диапазоне частот 500 ÷ 650 ГГц занимала около 20 минут при фиксированном напряжении смещения на СИС-смесителе (2,2 мВ для данных, представленных на рис. 4). Программа IRTECON позволяла также проводить дополнительную оптимизацию напряжения смещения СИС-смесителя для каждой рабочей точки FFO, в этом случае полное время измерения составляет 2 ÷ 3 часа. Из рис. 4 можно видеть, что зависимость Y -фактора (шумовой температуры) от тока смещения FFO достаточно плоская, что даёт возможность выбирать ток смещения, оптимальный для работы как СИС-смесителя, так и гармонического смесителя с системой ФАПЧ.

На рис. 5 представлена зависимость шумовой температуры сверхпроводникового интегрального приёмника от частоты FFO, пересчитанная из рис. 4. Видно, что шумовая температура заметно меняется с частотой, при этом шумовая температура порядка 250 К, требуемая для проекта TELIS, реализована к настоящему времени только при некоторых частотах диапазона и при физической температуре сверхпроводниковой части приёмника 2,1 К. При увеличении температуры до 4,2 К потери в сверхпроводниковых линиях на частотах выше 650 ГГц возрастают и шумы приёмника существенно увеличиваются. График зависимости шумовой температуры от

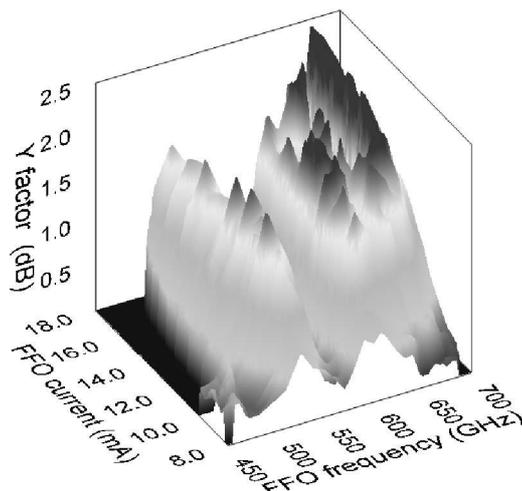


Рис. 4. Зависимость отклика интегрального спектрометра (Y -фактора) от частоты и тока смещения FFO (физическая температура смесителя 2,1 К, напряжение смещения СИС-смесителя 2,2 мВ, промежуточная частота 4,3 ГГц, полоса фильтра промежуточной частоты (ПЧ) 40 МГц) [12]

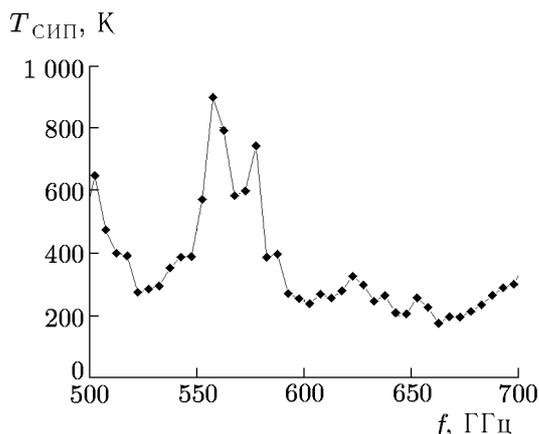


Рис. 5. Нескорректированная двухполосная шумовая температура сверхпроводникового интегрального приёмника в зависимости от частоты FFO, оптимизированная по току смещения FFO (физическая температура смесителя 2,1 К, напряжение смещения СИС-смесителя 2,2 мВ, промежуточная частота 4,3 ГГц, полоса фильтра ПЧ 40 МГц)

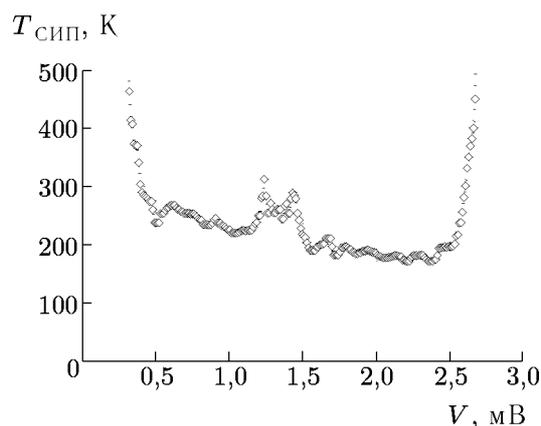


Рис. 6. Двухполосная шумовая температура сверхпроводникового интегрального приёмника в зависимости от напряжения смещения V СИС-смесителя, измеренная при фазовой синхронизации FFO на частоте 660,4 ГГц (промежуточная частота 4,3 ГГц)

частоты (рис. 5) хорошо совпадает с данными по измерению СВЧ отклика приёмника с помощью фурье-спектрометра. На рис. 6 показана зависимость шумовой температуры сверхпроводникового интегрального приёмника от напряжения смещения СИС-смесителя. Тщательная обработка данных по измерениям шумовой температуры и всесторонний анализ вклада отдельных компонентов сверхпроводникового интегрального приёмника в суммарную шумовую температуру будут проведены до первого тестового полёта по программе TELIS.

Для демонстрации частотного разрешения спектрометра со сверхпроводниковым генератором гетеродина в режиме ФАПЧ был измерен умноженный по частоте сигнал синтезатора (см. рис. 7). Измеренный на промежуточной частоте сигнал является свёрткой спектра гетеродина, который также показан на рис. 7, и умноженного спектра синтезатора. Видно, что при небольшом смещении частоты синтезатора сигнал полностью исчезает из полосы приёмника (штрихпунктирная линия). Несимметричность спектра FFO в данном случае вызвана наличием сверхтонкой резонансной структуры [14], которая существенно затрудняет процесс фазовой и частотной синхронизации. Влияние этой структуры было заметно ослаблено в последующих конструкциях микросхемы за счёт лучшего согласования и уменьшения отражений от элементов схемы. Были спроектированы, изготовлены и исследованы новые модификации FFO для работы в составе интегрального спектрометра для проекта TELIS. В результате проведённой оптимизации в диапазоне частот от 500 до 700 ГГц была достигнута ширина линии излучения от 9 до 2 МГц соответственно, что позволяет синхронизовать от 35 до 90 % мощности FFO. Ранее было показано, что для конкретной системы ФАПЧ доля синхронизованной мощности однозначно определяется шириной автономной линии излучения FFO [10].

Для проверки работоспособности системы ФАПЧ с полностью компьютерным управлением были разработаны дополнительные процедуры к программному комплексу IRTECON, с помощью которых удалось реализовать фазовую синхронизацию FFO во всех режимах аналогично процедуре ручной настройки [11]. Кроме того, система IRTECON позволяет оптимизировать работу связки гармонический смеситель—система ФАПЧ. Главным критерием правильной работы смесителя и ФАПЧ является сигнал промежуточной частоты на специальном выходе системы,

пропорциональный мощности FFO в режиме ФАПЧ, измеренной в полосе 1 МГц на центральной частоте. Отметим, что напряжение на этом выходе системы ФАПЧ пропорционально спектральному качеству линии излучения¹, и его значение может быть использовано для оценки синхронизированной части мощности FFO во время полёта прибора TELIS на борту аэростата. Разработанные процедуры позволяют оптимизировать спектральное качество FFO в режиме ФАПЧ путём независимой подстройки различных параметров системы стабилизации (смещения гармонического смесителя, мощности опорного синтезатора, коэффициента усиления системы ФАПЧ).

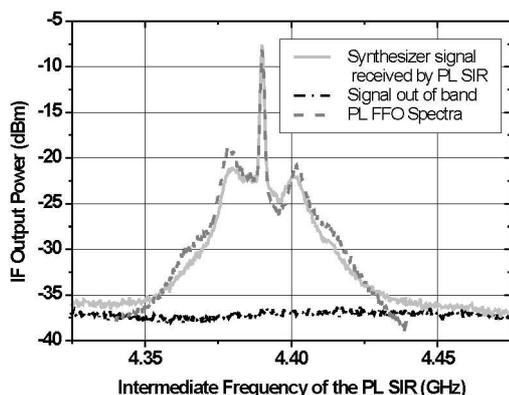


Рис. 7. Сигнал питаемого синтезатором умножителя ($17,967 \text{ ГГц} \times 37 = 664,8 \text{ ГГц}$), измеренный интегральным приёмником с FFO в режиме ФАПЧ на частоте $660,4 \text{ ГГц}$ (сплошная линия). Для спектра, показанного штрих-пунктирной линией, частота синтезатора была сдвинута на 5 МГц для того, чтобы сигнал оказался вне измеряемой полосы приёмника. Для сравнения штриховой линией представлен спектр генератора гетеродина в режиме ФАПЧ, измеренный на выходе гармонического смесителя и преобразованный по частоте [12]

сверхпроводникового генератора гетеродина в режиме ФАПЧ со спектральным качеством более 50% все проверенные нами методы хорошо восстанавливают форму принимаемого сигнала, при этом уровень шума увеличивается менее чем в 2 раза.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведённые результаты показывают, что уровень разработки интегральных приёмных систем доведён до стадии практического применения. Такие приёмники представляются чрезвычайно перспективными для мониторинга окружающей среды, осуществляемого с борта спутников, аэростатов или специальных самолётов, а также для космической и наземной радиоастрономии.

Работа поддержана РФФИ (проект № 03–02–16748), ИНТАС (проект № 01–0367), МНТЦ (проекты № 2445 и 3174), Программой ОФН РАН «Проблемы радиофизики», а также Советом при Президенте РФ по поддержке ведущих научных школ (грант № НШ-1344.2003.2).

¹ Спектральное качество линии — часть мощности излучения FFO, синхронизируемой в центральном пике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koshelets V. P., Shitov S. V., Filippenko L. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 68. P. 1 273.
2. Koshelets V. P., Shitov S. V. // Supercond. Sci. Tech. 2000. V. 13. P. R53.
3. Кошелец В. П., Шитов С. В., Филиппенко Л. В. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 8–9. С. 687.
4. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. P. 3 302.
5. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. P. 3 284.
6. Koshelets V. P., Shitov S. V., Shchukin A. V., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1999. V. 9, No. 2. P. 4 133.
7. Koshelets V. P., Shitov S. V., Dmitriev P. N., et al. // Physica C. 2002. V. 367. P. 249.
8. Shitov S. V., Koshelets V. P., Ermakov A. B., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13, No. 2. P. 684.
9. Hoogeveen R. W. M., Yagoubov P. A., de Lange S. A., et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 2005. V. 5 978. P. 59781F.
10. Yagoubov P. A., Dercksen J., Hoogeveen R. W. M., et al. // Abstracts 16th Int. Symp. Space Terahertz Technology, Sweden, May 2005. P. 156.
11. Koshelets V. P., Dmitriev P. N., Ermakov A. B., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. V. 15, No. 2. P. 964.
12. Koshelets V. P., Dmitriev P. N., Ermakov A. B., et al. // Abstract 16th Int. Symp. Space Terahertz Technology, Sweden, May 2005. P. 108.
13. Ermakov A. B., Shitov S. V., Baryshev A. M., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. V. 11, No. 1. P. 840.
14. Koshelets V. P., Ermakov A. B., Shitov S. V., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2001. V. 11, No. 1. P. 1 211.
15. Koshelets V. P., Shitov S. V., Ermakov A. B., et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2005. V. 15, No. 2. P. 960.

Поступила в редакцию 8 июня 2005 г.; принята в печать 10 октября 2005 г.

INTEGRATED SUPERCONDUCTING SPECTROMETER FOR ATMOSPHERE MONITORING

V. P. Koshelets, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, L. V. Filippenko, O. V. Koryukin, M. Yu. Torgashin, A. V. Khudchenko

In this paper the results of the development of submm Superconducting Integrated Receiver (SIR) for monitoring of the Earth atmosphere from the board of the high-altitude balloons are presented. The microcircuit of the superconducting integrated receiver comprising local oscillator based on long Josephson junction (flux flow oscillator, FFO) has been developed and successfully tested. The receiver noise temperature as low as 200 K has been measured at frequencies of about 650 GHz; a possibility to phase-lock FFO to the reference oscillator has been demonstrated — this is vitally important for spectrometer operation. To ensure the possibility of remote tuning of a phase-locked (PL) SIR on the board of a balloon a number of approaches for the PL SIR automatic computer control have been developed and tested. New modifications of the superconducting local oscillator (FFO) have been developed, fabricated and tested; an optimization of FFO design for integrated spectrometer has been performed. Using a specially developed technique FFO linewidth has been studied at frequencies up

to 700 GHz. A free-running linewidth between 9 and 2 MHz has been measured in the frequency range 500 ÷ 700 GHz. As a result the spectral ratio of the phased-locked FFO varies from 35 to 90 % correspondingly. The effect of FFO linewidth imperfections on retrieval procedure of the atmosphere gas spectra is discussed.