

**УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ
ИМ. В.А. КОТЕЛЬНИКОВА РАН**

На правах рукописи

КИСЕЛЕВ Олег Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАЗРАБОТКА
АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫМ
ИНТЕГРАЛЬНЫМ ПРИЕМНИКОМ**

Специальность 01.04.01. – Приборы и методы экспериментальной физики

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Научный руководитель
доктор физико-математических наук,
профессор В.П. Кошелец

Москва – 2011

Оглавление

Оглавление	2
<i>Список используемых сокращений и обозначений</i>	4
1. Введение	5
1.1. Вступление	5
1.2. Сверхпроводниковый интегральный приемник	8
1.2.1. Основные элементы СИП	8
1.2.2. СИС смеситель.	11
1.2.3. РДП в качестве гетеродина.	13
1.2.4. Гармонический смеситель и система ФАПЧ.	15
1.3. Задачи проекта TELIS.	17
1.4. Экспериментальная установка.	21
1.5. Применение СИП для спектрометрического исследования газовых смесей.	26
1.6. Постановка задачи.	26
2. Исследование основных электрофизических характеристик СИП	28
2.1. СИС смеситель	29
2.2. РДП, характеристики по постоянному току,	34
2.3. Гармонический смеситель и система ФАПЧ	39
2.4. Выводы главы	41
3. Оптимизация чувствительности и спектральных характеристик СИП	43
3.1. Оптимизация спектральных характеристик СИП	43
3.2. Оптимизация шумовой температуры СИП	52
3.3. Влияние температуры микросхемы на основные характеристики приемника.	60
3.4. Выводы главы.	64
4. СИП в качестве приемного элемента инструмента TELIS	66

4.1.	Инструмент TELIS.	66
4.2.	Система управления СИП в составе инструмента TELIS.	73
4.3.	Тестовые кампании инструмента TELIS.	80
4.4.	Полетные кампании инструмента TELIS, некоторые полученные результаты.	89
4.5.	Выводы главы.	94
5.	Применение СИП для исследования газовых смесей в лабораторных условиях.	95
5.1.	Установка исследования газов пассивным методом.	96
5.2.	Установка исследования газов активным методом.	102
5.3.	Выводы главы.	107
	Заключение.	108
	Список публикаций автора.	110
	Литература.	118

Список используемых сокращений и обозначений

ВАХ – вольт-амперная характеристика

РДП – распределенный джозефсоновский переход

СИС – сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник

СИП – сверхпроводниковый интегральный приемник

ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты

ГС – гармонический смеситель

ПЧ – промежуточная частота

СК – спектральное качество

1. Введение

1.1. Вступление

Последние несколько десятков лет идет интенсивное освоение терагерцовой области спектра электромагнитного излучения (0.3 ТГц – 10 ТГц). Этот диапазон лежит между ранее хорошо исследованными субмиллиметровыми радиоволнами и инфракрасной частью оптического спектра. Исторически сложилось, что терагерцовая область частот долгое время была мало исследована по сравнению с другими диапазонами ввиду сложности изготовления чувствительных приемников и достаточно мощных генераторов [1]. Однако, благодаря тому, что в данной области частот сосредоточены основные колебательно-вращательные переходы большинства молекул, содержащихся в межзвездном веществе, звездах, а также в атмосферах планет, терагерцовый диапазон частот весьма интересен как для астрономических, так и для атмосферных исследований. Более того, в этом же диапазоне находятся частоты медленных пространственных колебательных мод макромолекул. Таким образом, наблюдение и измерение спектральных линий в субмиллиметровом диапазоне является эффективным методом исследований в радиоастрономии [2-7], экологическом мониторинге атмосферы [8], биофизике [9,10], контроле взрывчатых и отравляющих веществ [11,12] а также в медицинских исследованиях [13].

В последнее время основным приемным элементом, используемым для решения задач, требующих низких шумов приемника, являются смесители на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС – смесители). Это объясняется как чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, так и их предельно низкими собственными шумами, обусловленными низкой рабочей температурой (температура жидкого гелия, или еще ниже). В диапазоне 100 – 1400 ГГц СИС - приемники обладают наименьшей шумовой температурой среди всех известных

когерентных приемников, она лишь в несколько раз превышает уровень квантовых шумов $hf/2k$ (здесь k – постоянная Больцмана, h – постоянная Планка, f – частота сигнала) [14-22]. Поскольку время накопления сигнала, необходимое для приема излучения слабых линий газов, и, следовательно, обнаружения сверхмалых концентраций веществ, пропорционально квадрату шумовой температуры используемого приемника, устройства на СИС-смесителях позволяют значительно сократить время наблюдения.

В настоящий момент СИС-приемники с внешним источником гетеродина получили широкое распространение, как в отдельно расположенных радиотелескопах, так и в составе приемников-интерферометров наземного базирования [23]. СИС смесители обладают высокой стабильностью по отношению к флуктуациям мощности гетеродина во время работы. В качестве гетеродина используются генераторы Ганна и гармонические умножители на основе барьера Шоттки, а в лабораторных исследованиях - лампы обратной волны.

Наблюдения в терагерцовой области спектра сильно затруднены, в основном, из-за сильного поглощения электромагнитного излучения этого диапазона парами воды, содержащимися в земной атмосфере (рис. 1.1), поэтому субмиллиметровые приемники и радиотелескопы располагаются либо в высокогорных областях с предельно низкой влажностью (RLT [24], SMA [5], ALMA [23]), либо устанавливаются на борту специальных самолетов (SOFIA [6]), спутников (Herschel [7]), и высотных аэростатов (MIPAS-B [25]). При этом большие габариты, вес и цена генераторов гетеродина в субмиллиметровом диапазоне длин волн являются основными факторами, ограничивающим широкое использование субмиллиметровых супергетеродинных приемников.

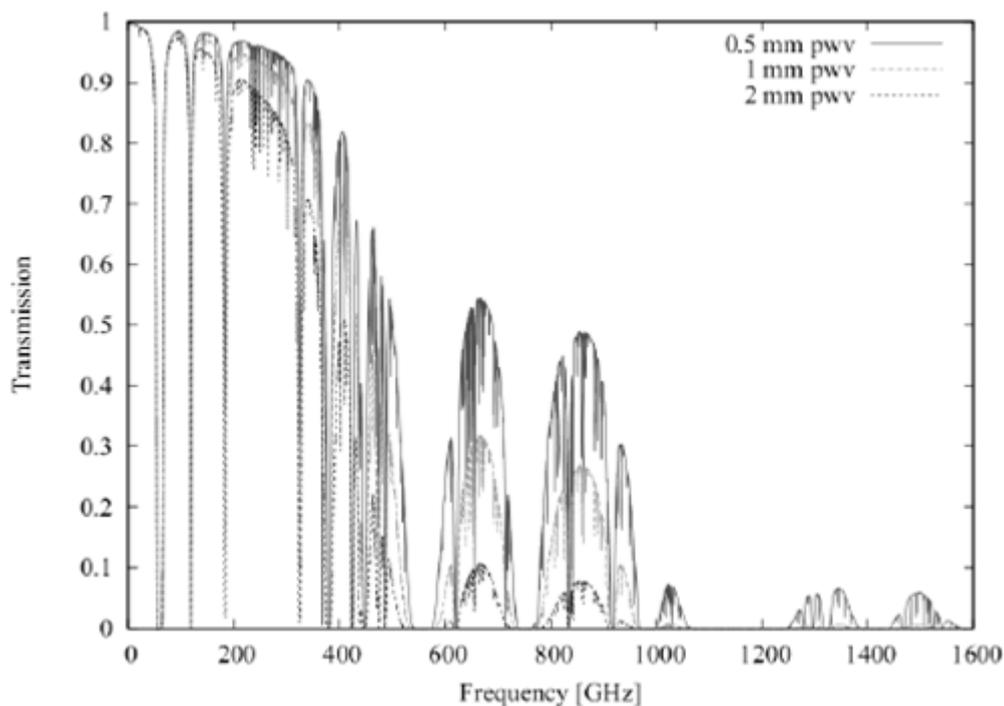


Рис. 1.1: Пропускание атмосферы, измеренное на плато Мауна Кеа, Hawaii, высота над уровнем моря 4200 м.

Для создания максимально чувствительного приемника ТГц диапазона, обладающего к тому же габаритами и энергопотреблением, позволяющими использовать его на мобильной платформе, в ИРЭ РАН была предложена концепция полностью сверхпроводникового интегрального приемника (СИП). Уникальность и новизна этой концепции состоит в том, что на одной микросхеме размещены все элементы, необходимые для супергетеродинного приема сигналов: СИС смеситель, сверхпроводниковый гетеродин на основе длинного джозефсоновского перехода (ДДП), длина которого велика по сравнению с глубиной проникновения магнитного поля в контакт и шириной перехода, гармонический смеситель для частотной стабилизации ДДП, планарная сверхпроводниковая приемная антенна, а также все согласующие структуры. Далее вместо ДДП будет использоваться аббревиатура РДП – распределенный джозефсоновский переход. Использование сверхпроводникового гетеродина с плавной перестройкой в широком диапазоне частот позволяет уменьшить вес спектрометра и потребляемую им

мощность. Это сделало СИП привлекательным как для бортовых применений, так и для различных лабораторных и биомедицинских исследований, а также для экологического мониторинга окружающей среды.

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.

Высокая чувствительность СИП, а также малые габариты и относительная простота управления конечным прибором, позволили применить СИП для спектроскопии газовых смесей с предельно малой концентрацией детектируемого вещества. Такие исследования могут быть применены, к примеру, в медицине для исследования выдыхаемого воздуха или для детектирования минимальных концентраций взрывчатых или отравляющих веществ в системах безопасности.

1.2. Сверхпроводниковый интегральный приемник.

В данной части работы представлено описание интегрального приемника, его составных частей и их характеристик. Эта часть необходима для последующего описания более сложных взаимодействий между составными частями СИП, представленного во 2-й главе, и исследования интегральных характеристик приемника, речь о которых пойдет в 3-й главе работы.

1.2.1. Основные элементы СИП.

Сверхпроводниковый интегральный приемник объединяет на одной микросхеме размерами 4 мм × 4 мм × 0.5 мм (фото центральной части микросхемы представлено на рис. 1.2), малошумящий СИС смеситель с двойной дипольной антенной, распределенный джозефсоновский переход (РДП), использующийся в качестве гетеродина, и гармонический смеситель (ГС) для фазовой стабилизации частоты РДП.

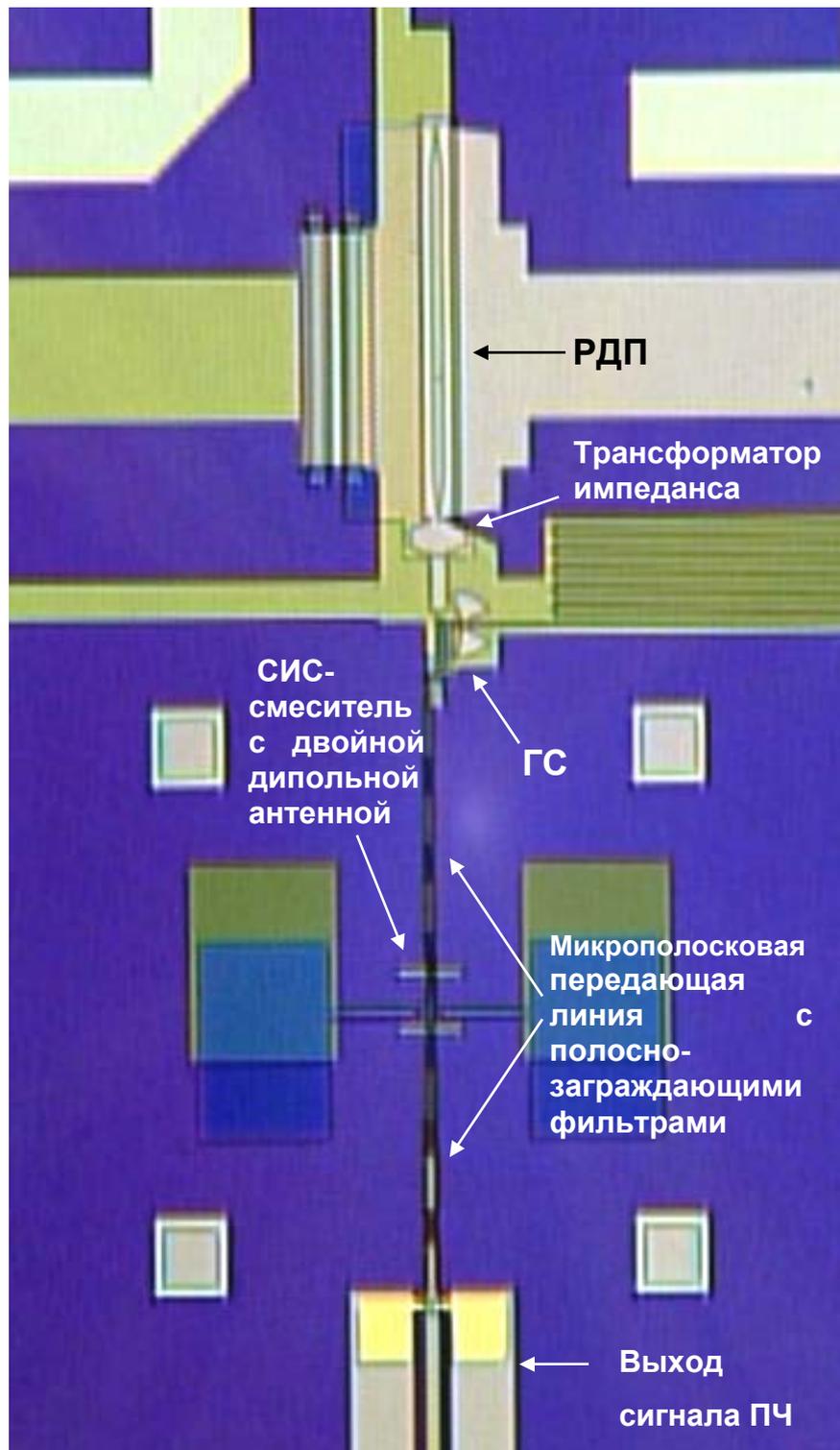


Рис. 1.2. Микрофотография центральной части одной из микросхем СИП.
Часть разводки и контактные площадки находятся за пределами кадра.
Размер видимой части приблизительно 1.5 мм на 1 мм.

Принципиальная схема СИП, включающая систему фазовой стабилизации частоты РДП, изображена на рис. 1.3. На СИС – смеситель через приемную антенну поступает входной сигнал от исследуемого источника и подается сигнал гетеродина от РДП. После перемножения этих сигналов, сигнал промежуточной частоты (ПЧ) поступает сначала на «холодный» НЕМТ усилитель, а затем на «теплые» усилители ПЧ, находящиеся вне криостата. Таким образом, формируется сигнал на выходе приемника. Автономная линия излучения РДП недостаточно стабильна, а её спектр обладает слишком большой для спектрометрических задач шириной, поэтому для стабилизации частоты РДП и сужения его спектра используется второй смеситель (работающий в гармоническом режиме) и система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Часть мощности РДП ответвляется на гармонический СИС – смеситель (ГС), в котором смешивается с m -ой гармоникой опорного синтезатора (19 - 21 ГГц), давая сигнал второй промежуточной частоты $f_{ПЧ2} = \pm (f_{РДП} - m \cdot f_{синт})$. Этот сигнал используется системой фазовой автоподстройки частоты. ФАПЧ имеет две параллельные цепи: система частотной стабилизации и система фазовой синхронизации, которые имеют различные полосы захвата и удержания.

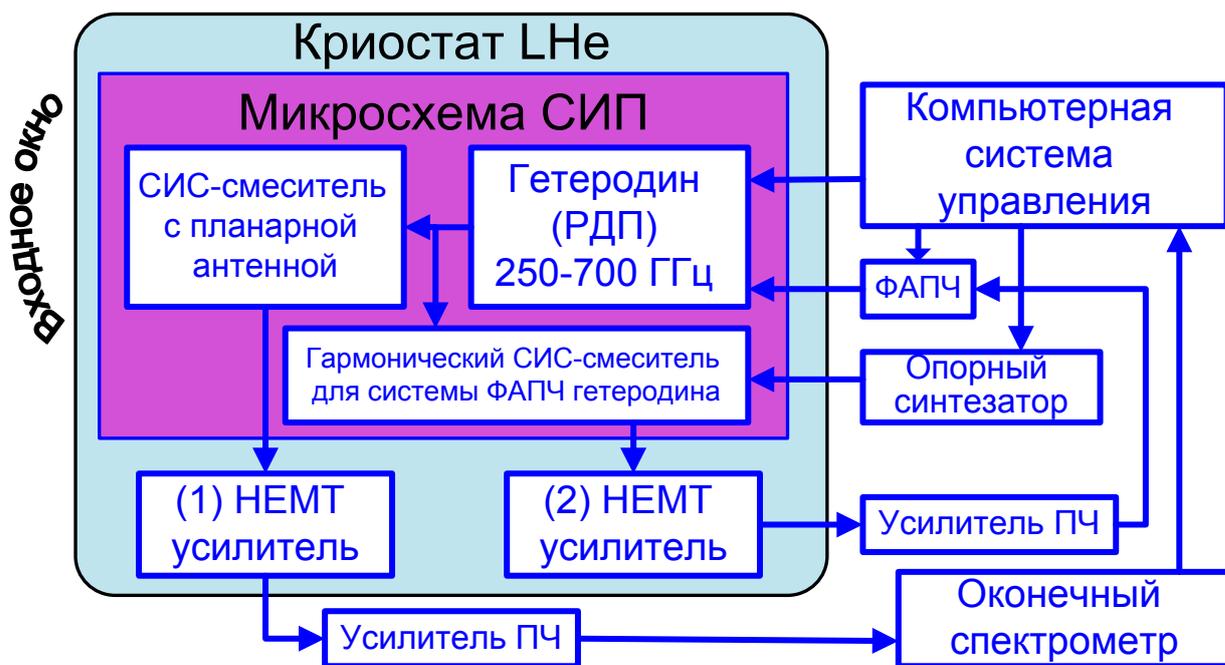


Рис. 1.3. Принципиальная блок-схема приемника.

1.2.2. СИС смеситель.

В данной работе рассматриваются микросхемы СИП, все туннельные структуры которых изготавливаются в Институте радиотехники и электроники им В.А. Котельникова РАН на основе Nb/AlN/NbN переходов [26,27]. На верхний NbN электрод напыляется слой ниобия, формирующий линии задания тока и СВЧ структуры для передачи сигнала и согласования элементов схемы, расположенных на подложке из кремния.

Барьерный слой в сверхпроводниковом туннельном СИС переходе представляет собой тонкую (1-2 нм) прослойку из диэлектрика, расположенную между двумя сверхпроводящими электродами. Через эту диэлектрическую прослойку может протекать туннельный ток как сверхпроводящих носителей (куперовских пар) - эффект Джозефсона [28, 29, 30], так и нормальных электронов (квазичастиц), обладающий сильной нелинейной зависимостью от приложенного к сверхпроводящим электродам напряжения. Нелинейная зависимость тока нормальных электронов I_{dc} от

напряжения V_{dc} , приложенного к туннельному переходу, лежит в основе реализации так называемого квантового режима преобразования частоты.

При воздействии на СИС переход высокочастотного сигнала происходит туннелирование, стимулированное фотонами. Этот квантовый процесс позволяет получать преобразование частоты вниз с усилением и шумами, ограниченными лишь квантовыми флуктуациями. Таким образом, СИС переходы являются уникальными приборами пригодными для регистрации, усиления и цифровой обработки слабых сигналов в диапазоне от постоянного тока до частот порядка одного терагерца. Значение СИС переходов в сверхпроводниковой электронике сегодня аналогично роли транзисторов в полупроводниковой электронике

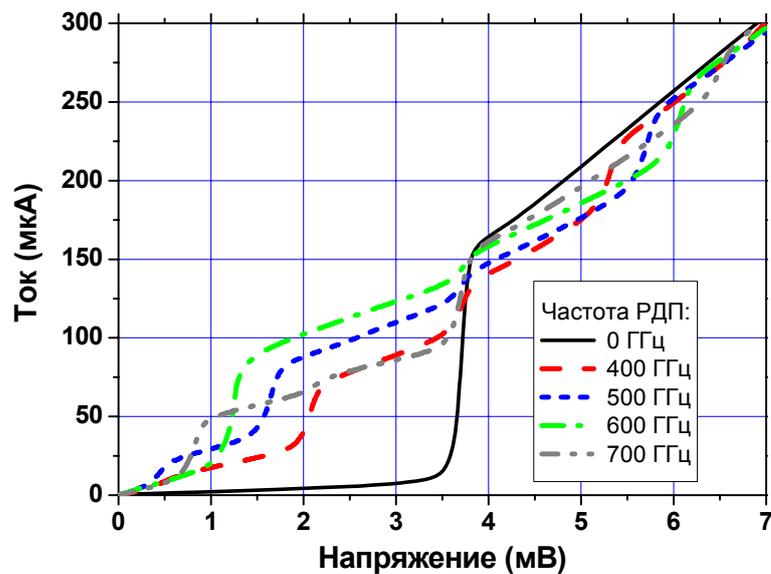


Рис. 1.4. Автономная ВАХ Nb/AlN/NbN СИС-смесителя и ВАХ для разных частот сигнала гетеродина, подаваемого от интегрального Nb/AlN/NbN РДП.

1.2.3. РДП в качестве гетеродина.

Гетеродин 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 частоту излучаемого сигнала можно перестраивать, изменяя ток смещения (I_B) и ток магнитного поля (I_{CL}). Напряжение РДП (и, следовательно, частота генерации) является функцией тока смещения I_B и тока I_{CL} . Ток I_{CL} , создающий магнитное поле на краях распределенного туннельного перехода, задается через специальную интегральную линию управления (см. рис. 1.5). Частота генерации РДП связана с напряжением РДП соотношением Джозефсона $f_{LO} = 2eV_{FFO}/h$ (где e и h заряд электрона и постоянная Планка).

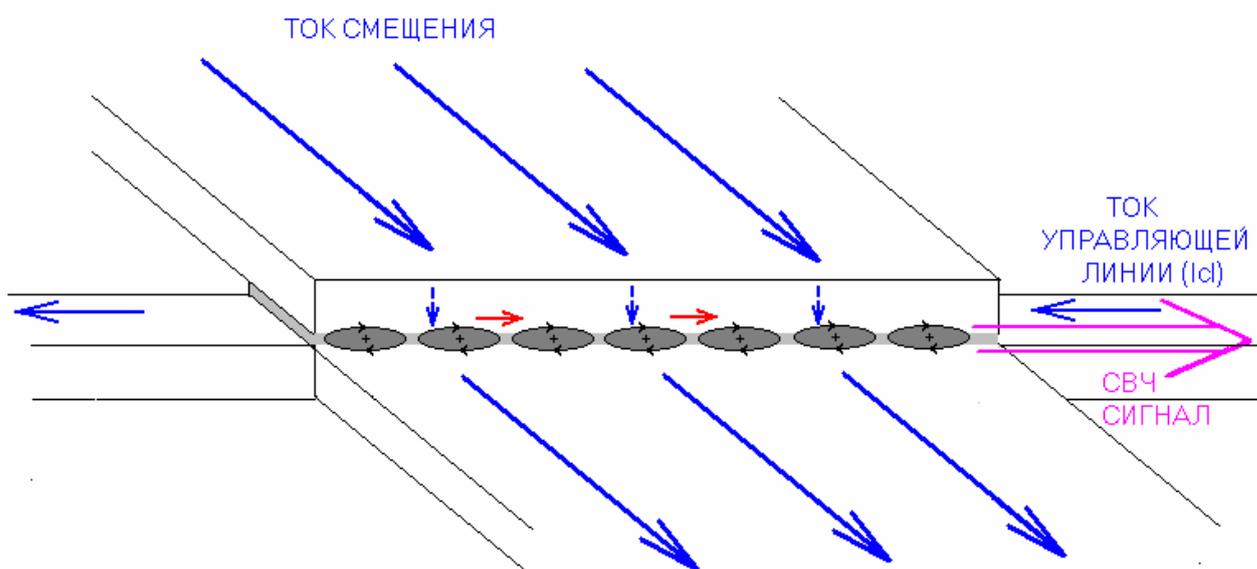


Рис.1.5 РДП с линией управления, интегрированной в нижний электрод [31].

Вольтамперные характеристики (ВАХ) Nb/AlN/NbN РДП, измеренные при разных значениях тока I_{CL} , имеют ярко выраженную резонансную структуру ступенек Фиске вплоть до частоты 600 ГГц (см. рис. 1.6). Цветом на ВАХ РДП отображается уровень накачки смесителя в процентах от скачка тока на щели (синий цвет соответствует минимальной накачке, красный – накачке более 25% от скачка тока на щели). При напряжении на переходе более $1/3$ щелевого начинает проявляться эффект поглощения переходом собственного излучения [32], что приводит к резкому увеличению внутреннего затухания и уширению автономной линии генерации, Δf . С другой стороны, работа в области ступеней Фиске осложняется тем, что на этой резонансной структуре невозможно плавное изменение частоты генерации РДП, а ширина линии генерации зависит от положения рабочей точки на ступени Фиске, о чем будет подробно рассказано в главе 3. Это означает, что для использования РДП в качестве генератора гетеродина и создания алгоритмов автоматизированного управления его свойства должны быть тщательно исследованы. РДП соединяется со смесительным элементом, расположенным внутри двойной дипольной антенны, с помощью микрополосковой линии, содержащей согласующие СВЧ структуры и развязки по постоянному току. Как РДП, так и СИС имеют интегральные управляющие линии, с помощью которых задаются локальные магнитные поля. Для уменьшения влияния магнитного поля СИС смесителя на РДП линия управления смесителя имеет П-образную форму и расположена перпендикулярно РДП, что обеспечивает уровень паразитного магнитного поля не более 10^{-3} .

Путем оптимизации конструкции интегрального приемника удалось добиться, что мощность, генерируемая РДП, достаточна для накачки СИС-смесителя в широком диапазоне.

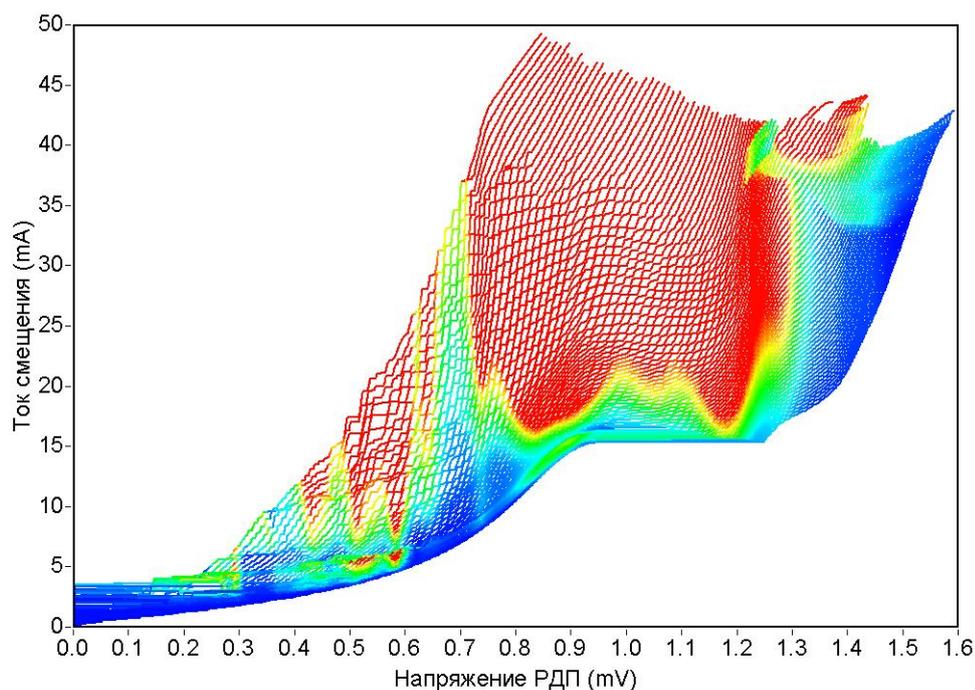


Рис 1.6. Семейство ВАХ РДП. Цветом показан уровень накачки СИС смесителя

1.2.4. Гармонический смеситель и система ФАПЧ.

СИП содержит дополнительный гармонический СИС смеситель, используемый для получения сигнала на разностной частоте между частью сигнала РДП и n -ой гармоникой внешнего синтезатора. ПЧ сигнал от смесителя затем усиливается с помощью широкополосного (4 - 8 ГГц) НЕМТ усилителя с низким уровнем собственных шумов. Входной сигнал ФАПЧ преобразуется с 4 ГГц до 400 МГц дополнительным преобразователем частоты, интегрированным с теплым усилителем ПЧ. Внутри системы ФАПЧ частота и фаза результирующего сигнала гармонического смесителя сравнивается с опорным сигналом частоты 400 МГц. Затем ФАПЧ генерирует сигнал обратной связи, который подается в линию управления РДП для компенсации фазовой ошибки. Компоненты системы ФАПЧ размещаются как можно ближе к криостату для уменьшения общей длины соединений системы ФАПЧ. Для контроля работы системы ФАПЧ измеряются величины фазовой и частотной ошибок. Часть сигнала РДП промежуточной частоты 400 МГц выводится на внешний анализатор спектра

(см. рис. 1.7) – и мы визуально можем определять рассогласование частоты генерации РДП и кратной гармоники опорного синтезатора, корректировать ее. Кроме того, именно этот сигнал используется для измерения ширины автономной линии генерации РДП.

Отличие режима работы гармонического смесителя от детекторного СИС перехода состоит в том, что на ГС подаются два сигнала, сильно различных по частоте (порядка 20 ГГц и 600 ГГц). На нелинейности ГС происходит генерация гармоник сигнала опорного синтезатора, которые затем и перемножаются с сигналом РДП.

Одним из наиболее важных параметров генератора гетеродина, работающего в составе приемника, является его спектральное качество (СК) – отношение фазово-синхронизированной системой ФАПЧ мощности, заключенной в центральном пике, к общей излучаемой мощности генератора. Чем меньше автономная ширина линии, тем больше величина СК для данной системы ФАПЧ [33]. При ширине линии излучения 1.7 МГц удается синхронизировать до 92% мощности (см. рис. 1.7).

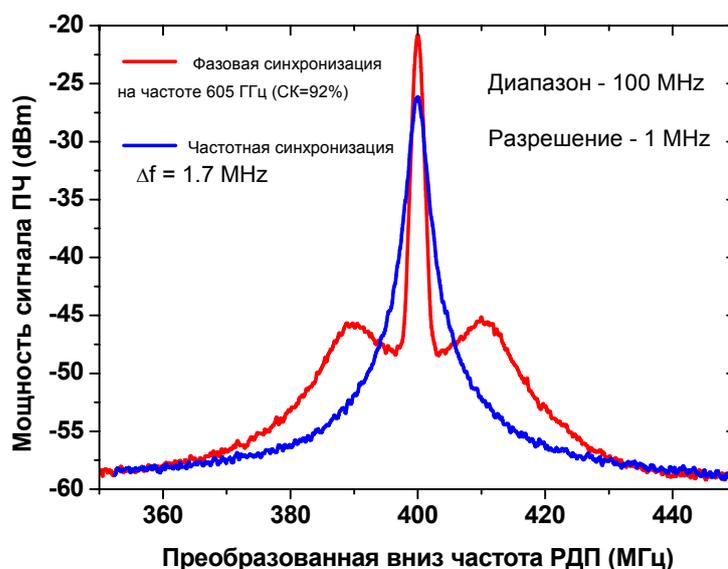


Рис. 1.7. Преобразованные вниз по частоте спектральные линии излучения Nb/AlN/NbN РДП в режиме частотной (синяя кривая) и фазовой (красная кривая) стабилизации. Центральная частота генератора 605 ГГц.

В нашей лаборатории ведутся исследования по созданию криогенной системы ФАПЧ [34], что позволит резко улучшить спектральные характеристики прибора – при той же ширине линии излучения РДП возможно будет достигать много больших значений СК, что требуется при использовании СИП, к примеру, в радиоастрономических наблюдениях. Криогенная система ФАПЧ перспективна для создания многоэлементных матричных сверхпроводниковых приемников. Усилители, используемые в петле криогенной ФАПЧ, могут быть заменены уже разработанными сверхпроводниковыми СКВИД – усилителями. Таким образом, все элементы петли системы могут быть сверхпроводниковыми, что позволяет говорить о возможности их интеграции в одну микросхему. В качестве фазового детектора планируется использовать дополнительный СИС переход.

1.3. Задачи проекта TELIS.

Целью проекта TELIS, в котором участвуют DLR (аэрокосмическое агентство Германии), 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 трех сверхпроводниковых приемников, интегрированных в один криостат.

Суть применяемого метода исследований, заключается в детектировании линий излучения молекул исследуемых газов в атмосфере. Так как прибор является спектрометром, то в результате измерений определяется форма линии поглощения. Далее измеренные спектры сравниваются с модельными, и определяются значения параметров модели, в том числе и концентрация наблюдаемого вещества.

На рис. 1.8 изображен принцип наклонного сканирования – телескоп инструмента, установленного на аэростате, обладает очень узким углом обзора, таким образом, при изменении угла наклона меняется высота, на

которой принимаемый луч касается атмосферы земли. Основной вклад в линию излучения вносит слой атмосферы, который луч прошел по касательной. Таким образом, изменяя угол наклона телескопа, строится развертка спектра излучения в зависимости от высоты. Минимальная высота сканирования ограничивается высотой, на которой происходит полное поглощение полезного сигнала парами воды.

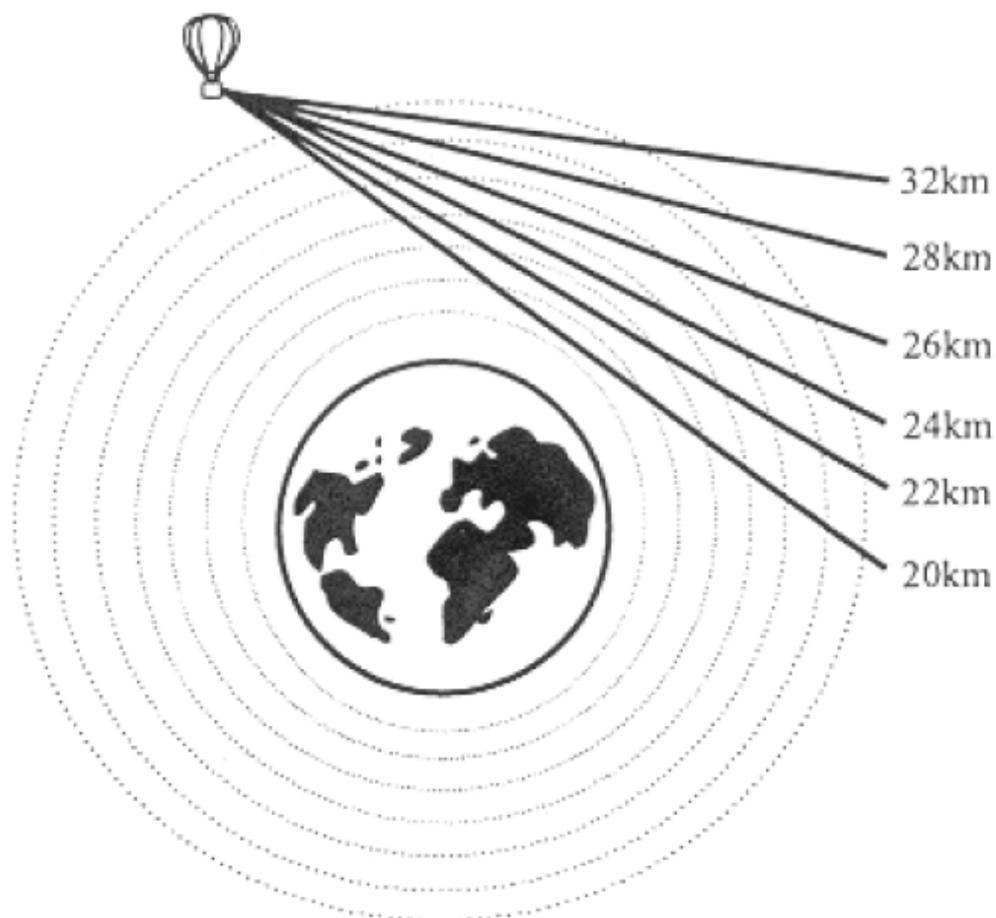


Рис. 1.8. Иллюстрация принципа наклонного сканирования атмосферы. Шаг сканирования – 2 км. [35]

Основной задачей инструмента TELIS 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. В число исследуемых газов и соединений входят ОН,

СН, NH, HCl, ClO, H₂O, BrO, озон и многие другие. Эти вещества активно взаимодействуют друг с другом и оказывают влияние на процессы, происходящие в атмосфере и стратосфере. К примеру, вещества OH, NO₂, Cl, ClO, Br, BrO выступают в роли катализаторов при разрушении стратосферного озона. Прибор TELIS позволяет одновременно измерять концентрацию как озона, так и веществ-катализаторов, что дает возможность выстроить более точные модели разрушения озонового слоя.

Измерения спектров проводятся одновременно на частоте 500 ГГц (приемник разработан в RAL), 490 – 650 ГГц (SRON в сотрудничестве с ИРЭ РАН) и 1.8 ТГц (DLR). На одну платформу с криостатом интегрируются также дополнительные квазиоптические устройства и оборудование обработки сигнала промежуточной частоты. Основное зеркало телескопа может поворачиваться вокруг горизонтальной оси, обеспечивая лимбовое (наклонное) сканирование в диапазоне высот от верхней стратосферы (30 – 40 км) до верхней тропосферы (10 км.). Неохлаждаемый квазиоптический тракт мультиплексирует принятый сигнал, распределяя его на несколько измерительных каналов, работающих одновременно. Специальное управляемое зеркало может направить на входную апертуру инструмента для радиометрической калибровки излучение абсолютно черного тела или излучение холодного неба. При помощи охлаждаемого квазиоптического тракта исследуемый сигнал фокусируется на антенне микросхемы СИП. Общий вид криостата инструмента TELIS представлен на рис. 1.9.

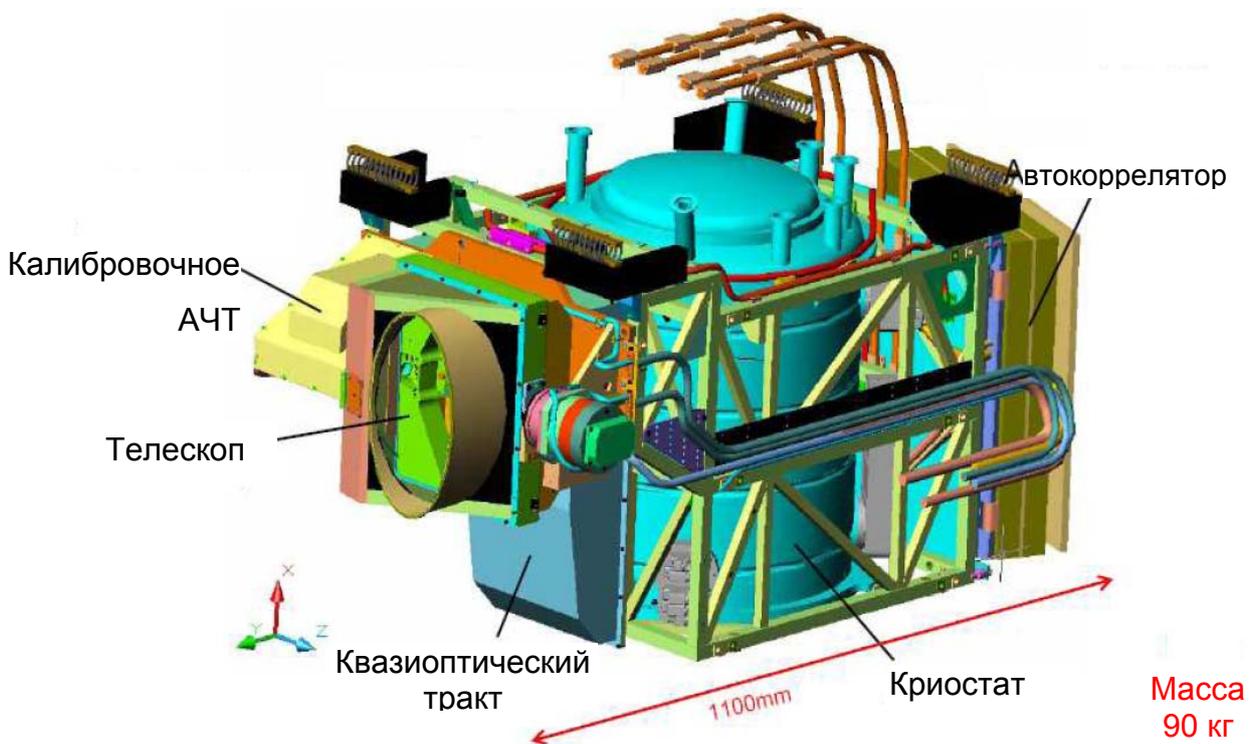


Рис 1.9 Трехмерная модель полетного криостата, разработанного для проекта TELIS [Christian Sartorius, Forschungszentrum Karlsruhe].

К СИП как приемному элементу инструмента TELIS изначально предъявлялись высокие требования – в субмиллиметровом диапазоне интенсивность спектральных линий исследуемых газов очень мала, к примеру, линия BrO, одного из каталитических деструкторов стратосферного озона, обладает интенсивностью всего в 0.3 К, и наблюдение такой линии требует как низкой шумовой температуры приемника, так и высокой стабильности его параметров – накопление сигнала такой слабой линии необходимо производить в течение нескольких десятков минут. Высокие требования к стабильности параметров приемника, в сочетании с его высокой чувствительностью к параметрам внешней среды (температура, давление) потребовали создания сложной многоступенчатой системы отбора образцов СИП, его тестирования, а также алгоритмов управления им во время полета.

1.4. Экспериментальная установка.

В данной части работы описывается сама микросхема СИП, экспериментальная установка для ее исследования и система крепления микросхемы приемника, разработанная для установки СИП в криостат инструмента TELIS.

Микросхемы СИП, исследованные в данной работе, изготавливаются из высококачественных трехслойных структур Nb/AlN/NbN на подложке из кремния (см. рис. 1.10) [26, 27]. Двойная дипольная антенна СИС-смесителя помещена в геометрический центр схемы, где входящий СВЧ сигнал фокусируется микроволновой кремниевой.

Кремниевая линза имеет форму усеченного эллипса, антенна располагается на плоской поверхности, выполненной в сечении дальнего фокуса (диаметр - 10 мм). Для минимизации отражений на границе линзы ее изогнутая поверхность покрыта антиотражающим покрытием из слоя Stycast толщиной 74 мкм (толщина оптимизирована для частоты 600 ГГц). Принимаемый сигнал на антенну сквозь материал подложки приемника, которая является частью оптической системы. Дипольная антенна обладает симметричной в направлении, перпендикулярном к плоскости образца, диаграммой направленности, поэтому на поверхности образца устанавливается кремниевый рефлектор с размерами 0.5 мм x 0.5 мм с покрытием из пленки ниобия. Толщина рефлектора равна четверти длины волны в монокристаллическом кремнии на частоте 650 ГГц – 34 мкм.

Описанная далее механическая система размещения образца была разработана инженерами Института Космических Исследований Нидерландов (SRON) специально для установки в полетный криостат проекта TELIS, однако ее универсальность позволила использовать ее для тестирования микросхем интегрального приемника в специальном тестовом криостате. Взаимозаменяемость блоков дала возможность проводить исследования характеристик полетных образцов интегрального приемника в

лабораторных условиях, и только на конечном этапе монтировать собранный и протестированный блок в полетный криостат.

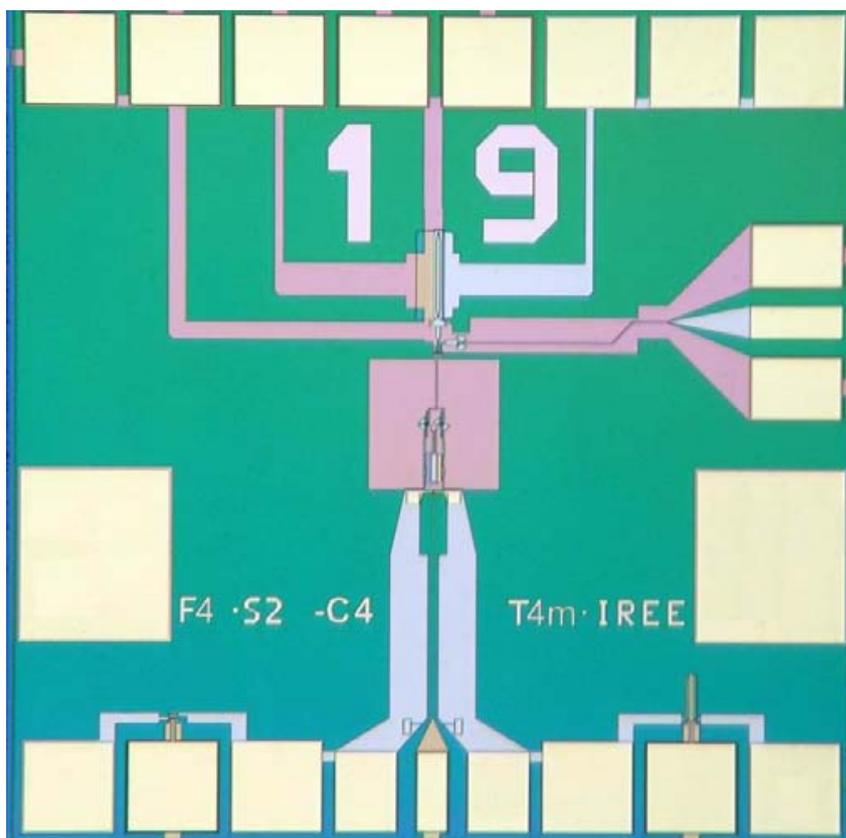


Рис. 1.10. Микросхема СИП.

Микросхема СИП устанавливается на плоскую поверхность кремниевой линзы, которая, в свою очередь, закреплена в специальном смесительном блоке. Этот блок обеспечивает охлаждение микросхемы вместе с окружающими ее элементами, а также служит держателем платы смещения, по которой передаются радиочастотные сигналы от микросхемы и задаются токи питания чипа (рис. 1.11). На плате смещения также реализованы СВЧ фильтры, для отдельного задания тока смещения и СВЧ сигнала на СИС переходы. Для расширения рабочей полосы ПЧ непосредственно на поверхности самой микросхемы были интегрированы согласующие элементы диапазона частот 4 - 8 ГГц. Хотя все элементы приемника, расположены на площади примерно 1 мм × 1 мм, размеры чипа, главным образом, определяются размером контактных площадок,

выбранным достаточно большим для облегчения процесса их присоединения к внешней системе посредством ультразвуковой сварки.

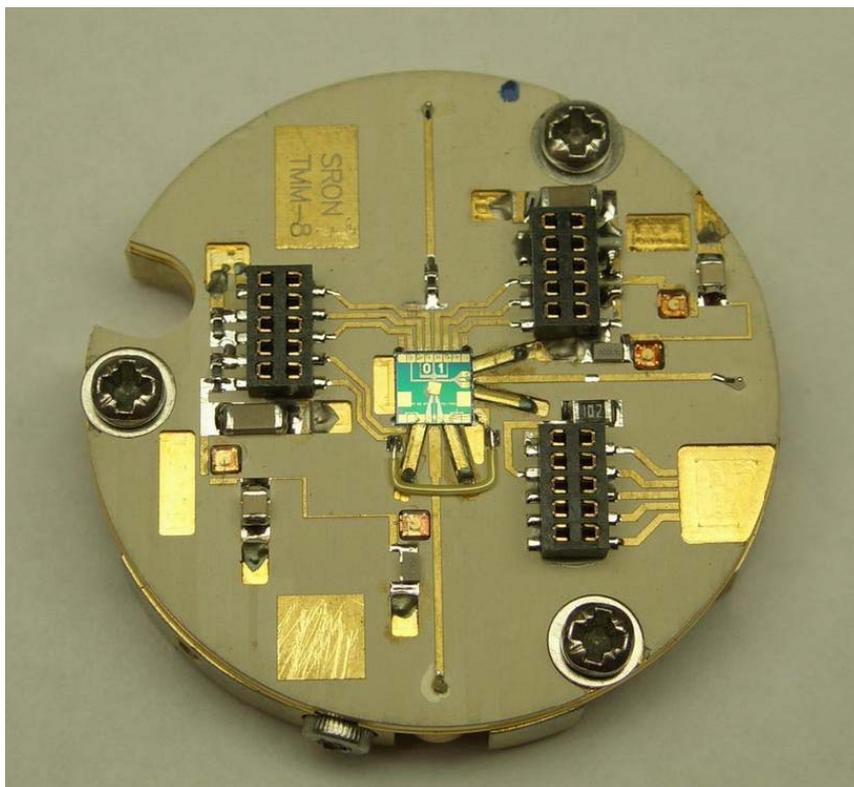


Рис. 1.11. Фотография микросхемы СИП, смонтированной на линзе в смесительном блоке с платой смещения.

Поскольку РДП очень чувствителен к слабым магнитным полям, микросхема СИП должна располагаться внутри магнитного экрана. Система магнитной экранировки состоит из двух цилиндрических стаканов (см. рис. 1.12). Внешний экран выполнен из криогенного пермаллоя, а внутренний сверхпроводящий экран изготовлен из 100 мкм свинцовой пленки, электролитически осажденной на медный стакан. Длина внутреннего экрана составляет 90 мм, диаметр – 25 мм.

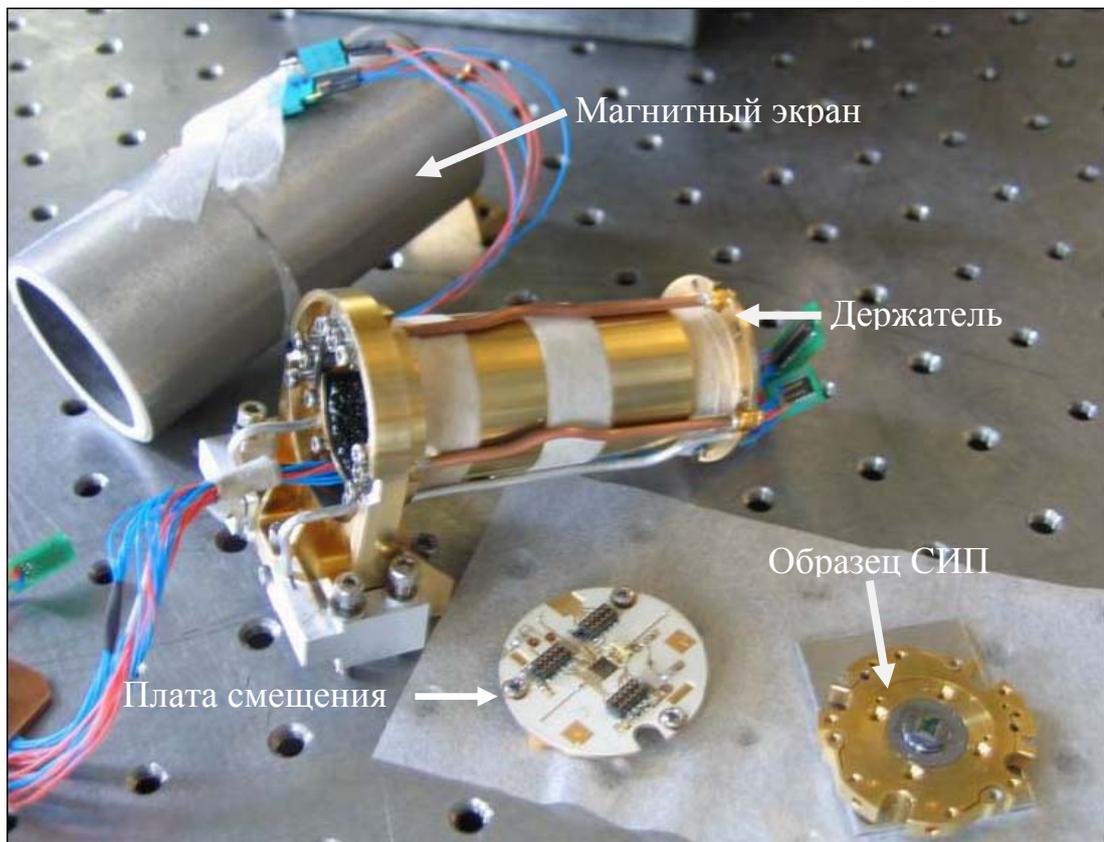


Рис. 1.12. Фотография магнитных экранов, платы смещения, держателя и установочного столика с линзой с установленным на ней образцом.

К экспериментальной установке, предназначенной для исследования характеристик СИП, предъявляются строгие требования – малые собственные шумы, высокая точность измерений, высокая стабильность. Все измерения, приведенные в данной работе, были проведены с помощью TSCU (Telis Source Control Unit) электроники, разработанной и собранной в SRON. Блок-схема установки исследования характеристик СИП представлена на рис. 1.13.

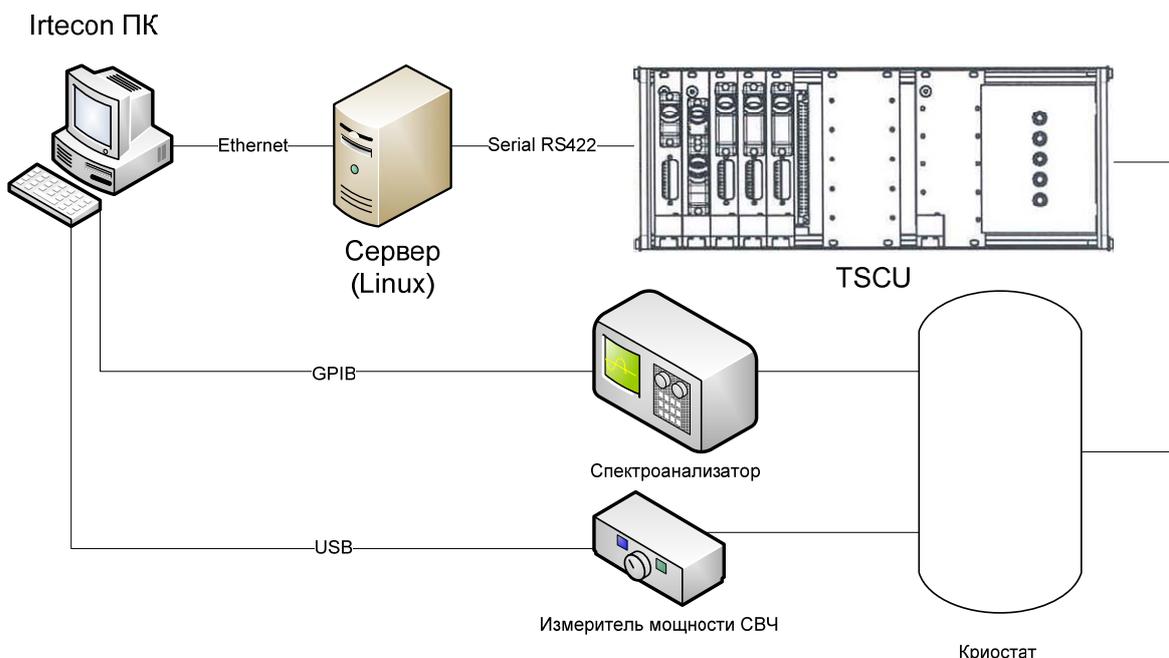


Рис. 1.13. Блок-схема лабораторной измерительной установки.

Данная система разрабатывалась для использования в рамках проекта TELIS и предназначена для установки на аэростате. Для этого измерительная система была сделана максимально компактной, в ней используется питание от блока батарей. Так как на аэростате установлено несколько приборов, управляемых с разных компьютеров, в измерительной системе присутствует сервер, объединяющий команды для разных приборов и использующий радиоканал для связи с аэростатом. Для лабораторных исследований система измерений была частично изменена – некоторые элементы были переведены на питание от сети для сохранения ресурса батарей, а также использовано прямое подключение сервер – TSCU вместо радиоканала.

В блоке TSCU установлены платы задания токов смещения и контрольных линий, блоки питания усилителей, а также аккумуляторные батареи. Наиболее чувствительные блоки – блоки задания и измерения напряжения и токов, не связаны с сетью 220В/50Гц и компьютером, что позволило уменьшить собственные шумы измерительной системы. Шумы системы измерения напряжения РДП не превышают 0.7 мкВ.

1.5. Применение СИП для спектрометрического исследования газовых смесей.

Исследование и анализ микросостава многокомпонентных газовых смесей относятся к числу наиболее сложных аналитических задач различных областей науки: экологии, медицине и прочих. В медицине одной из интереснейших задач для неинвазивной диагностики является анализ выдыхаемого воздуха. Выдох человека представляет собой многокомпонентную газовую смесь. На основании измерений концентрации веществ-маркеров в выдыхаемом воздухе можно судить о наличии того или иного патологического процесса в организме. Успехи в разработке и применении СИП для спектрометрии атмосферы позволили расширить область его применения и использовать СИП в качестве высокоточного лабораторного спектрометра для исследования состава газовых смесей.

Большой актуальностью обладают задачи, связанные с безопасностью. Терагерцовое излучение обладает гораздо большей проникающей способностью по сравнению с оптическими методами, при достаточной разрешающей способности, определяемой длиной волны излучения (0.3 мм для 1 ТГц). СИП был использован для тестовых измерений в качестве приемного элемента терагерцового тепловизора, продемонстрировав рекордную для устройств этого класса чувствительность в 13 ± 2 мК при постоянной времени в 1 с. [36]. Этот прибор может быть использован для создания системы безопасности для обнаружения спрятанных, в том числе и под одеждой опасных и запрещенных предметов (пластиковое оружие, взрывчатка, наркотики).

1.6. Постановка задачи.

Несмотря на то, что концепция сверхпроводникового интегрального приемника была разработана достаточно давно, ранее задача использования интегрального приемника не как объекта исследования, а как законченного прибора для применения в составе научного инструмента, не ставилась. Для того чтобы обеспечить работу СИП в составе инструмента TELIS, возникла

необходимость превратить объект лабораторного исследования в готовый к использованию, надежный, удаленно управляемый прибор.

Главной целью настоящей диссертационной работы является создание универсальной системы оптимизации рабочих характеристик и удаленного управления работой СИП в качестве приемного элемента спектрометра, а также применение СИП для исследования газовых смесей в лабораторных условиях.

Для достижения этой цели должен быть решен ряд задач:

1. Изучение спектральных, шумовых и вольт-амперных характеристик всех элементов сверхпроводникового интегрального приемника, разработка комплексной методики тестирования и оптимизации режимов его работы для достижения характеристик, удовлетворяющих спецификациям инструмента TELIS (частотный диапазон 450-650 ГГц, шумовая температура не более 250 К, спектральное разрешение – менее 1 МГц).
2. Разработка, экспериментальная проверка и практическая реализация эффективных алгоритмов дистанционного управления интегральным приемником, создание на их основе автоматизированной системы управления его работой во время полета на высотном аэростате.
3. Создание лабораторной установки для спектроскопии газовых смесей в субтерагерцовом диапазоне, разработка методики исследования малых концентраций веществ двумя методами: на фоне широкополосного и узкополосного перестраиваемого источников терагерцового излучения.

2. Исследование основных электрофизических характеристик СИП

Создание системы управления сложным прибором начинается с исследования его характеристик, свойств всех его составных частей, изучения их взаимодействия друг с другом, и оценки влияния параметров отдельных элементов и узлов на спектральные характеристики и чувствительность спектрометра в целом.

СИП является чрезвычайно чувствительным к внешним воздействиям прибором, что сильно усложняет его применение в составе конечных измерительных комплексов. Любые изменения внешних параметров могут привести к изменению режима работы какого-либо элемента СИП, кроме того, сами по себе настройки рабочих режимов всех компонентов СИП необходимо производить с чрезвычайно высокой точностью. Невозможно, измерив характеристики конкретно взятого образца микросхемы и определив рабочие параметры, в следующих циклах измерений просто устанавливать эти параметры и производить прием сигнала. После каждого охлаждения или значительного изменения внешних условий необходимо производить некоторый цикл исследования характеристик прибора, по результатам которого делать вывод о возможности продолжения эксперимента и устанавливать предварительные границы оптимизации его параметров. Детальное тестирование возможно проводить только в лабораторных условиях; для обеспечения возможности управления приемником в полете необходимо было разработать алгоритмы управления, которые позволяют (используя начальные параметры оптимизации и ранее полученные сведения о зависимостях параметров и их взаимном влиянии) осуществлять быструю подстройку прибора и в конечном итоге проводить измерения спектров. В данной главе представлены результаты исследования основных электрофизических характеристик составных частей СИП и зависимости их параметров от внешних условий.

2.1. СИС смеситель

Типичная ВАХ СИС смесителя представлена на рис. 2.1. На рисунке также отмечены основные электрофизические параметры СИС перехода, характеризующие его качество.

За величину нормального сопротивления R_n принимается дифференциальное сопротивление выше целевого напряжения (3.7 мВ для рассматриваемых в этой работе переходов Nb/AlN/NbN). Значение сопротивления утечки R_j определяется как сопротивление касательной к ВАХ, проведенной из нуля и лежащей ниже ВАХ.

Для применений, где используется квазичастичная нелинейность, а критический ток целенаправленно подавляется, важнейшей характеристикой является качество туннельного барьера, которое характеризуется малым током утечки. В связи с этим наиболее адекватной характеристикой является соотношение R_j/R_n .

Для получения квантового режима преобразования на квазичастичной нелинейности требуется малая величина размытия энергетической щели dV_g . Эта величина измеряется как разность напряжений в точках, где дифференциальное сопротивление $R_d = R_n/2$ (выше щели) и $R_d = R_n$ (ниже щели). Сама величина V_g определялась как значение напряжения в точке с минимальным R_d .

Параметрами, наиболее правильно характеризующими толщину туннельного барьера, являются удельное сопротивление перехода $R_n A$ и плотность квазичастичного тока $j_g = I_g/A$. Величина I_g определяется по скачку тока на щели, измеряемому по уровню $R_n/2$ [50].

Для оптимальной работы СИС смесителя требуется магнитное поле для подавления нестационарного эффекта Джозефсона, присутствие которого вносит дополнительные шумы, в том числе за счет неустойчивости рабочей точки смесителя. На микросхеме СИП вблизи СИС перехода располагается специальная сверхпроводящая микрополосковая линия (контрольная линия), используемая для задания тока, создающего магнитное поле в области СИС

перехода. Картина подавления критического тока сдвоенного СИС перехода, используемого в качестве смесителя, представлена на рис. 2.2. По оси абсцисс отложен ток СИС смесителя при напряжении примерно 0.1 мВ – в области, где влияние джозефсоновского тока наиболее заметно на ВАХ. Сдвоенный СИС переход, по сути, представляет собой двухконтактный сквид интерферометр, зависимость максимального бездиссипативного тока которого от внешнего магнитного поля описывается формулой

$$I_{\max} = 2I_{c\max} |\cos(\pi\Phi / \Phi_0)|,$$

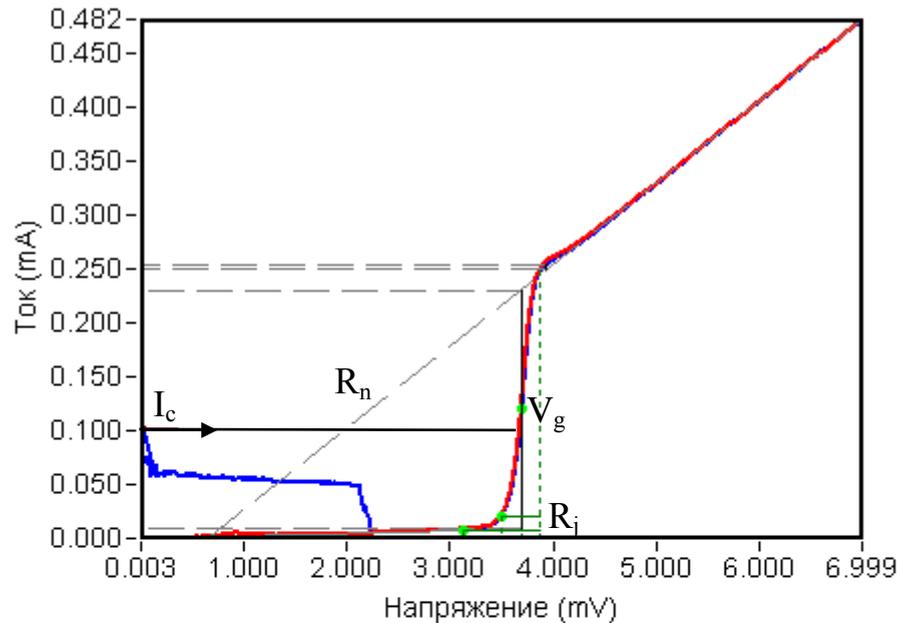
где Φ – полный магнитный поток, охватываемый кольцом интерферометра, $\Phi_0 = \pi\hbar/e$ – квант магнитного потока, а $I_{c\max}$ – максимальный ток единичного СИС перехода, также зависящий от внешнего магнитного поля:

$$I_{c\max} = I_c \left| \frac{\sin(\pi\Phi_s / \Phi_0)}{\pi\Phi_s / \Phi_0} \right|,$$

где Φ_s – магнитный поток в единичном (single) переходе.

Таким образом получается картина подавления критического тока сдвоенного СИС перехода – периодическая структура с модуляцией амплитуды [51]. Если в процессе охлаждения или предварительных измерений в сверхпроводящей пленке вблизи СИС - перехода будет захвачен квант магнитного потока, то картина подавления критического тока изменится (пример зависимости показан на рис. 2.3), и полное подавление критического тока становится невозможным. В этом случае для удаления захваченного кванта потока и восстановления критического тока необходимо произвести отогрев образца.

(T4m-093#05m, 16-Nov-2007) SIS ($R_n=13.20$ $R_j/R_n=31.0$ $V_g, mV=3.69$)



Sample = T4m-093#05m Points = 351

Area,one[sq.um] = 50.00

Cs [fF/sq.um] = 65.00

Rn,arr [Ohm] = 13.20

Rj [Ohm] = 409.2

R2 [Ohm] = 39.8

Ig [uA] = 222

Ic [uA] = 102

Ik [uA] = 5

Vg [mV] = 3.69

dVg [mV] = 0.379

DVg [mV] = 0.739

Fres [GHz] = 0.0

R serial = 0.0

Q-ty in array = 1

Type of array = serial

Rn,one [Ohm] = 13.2

RnA = 660.0

Rj/Rn = 31.00

Vm=R2Ic [mV] = 4.05

R2[.7Ig] [mV] = 6.18

Vo=RnIc [mV] = 1.34

Ic/Ig = 0.46

Ik/Ig = 0.02

Jg [A/sq.cm] = 444

Jc [A/sq.cm] = 204

R parallel = 1.0e+09

Рис 2.1. Автономная ВАХ СИС смесителя. Синяя кривая – без подавления критического тока, красная – критический ток подавлен (см. далее). Указаны параметры перехода: I_c – максимальное (критическое) значение сверхпроводящего тока, стрелкой показано направление скачка напряжения, пунктирные прямые линии обозначают – сопротивление в нормальном состоянии R_n ; щелевое напряжение V_g и область возрастания тока dV_g ; прямая R_j характеризует ток утечки.

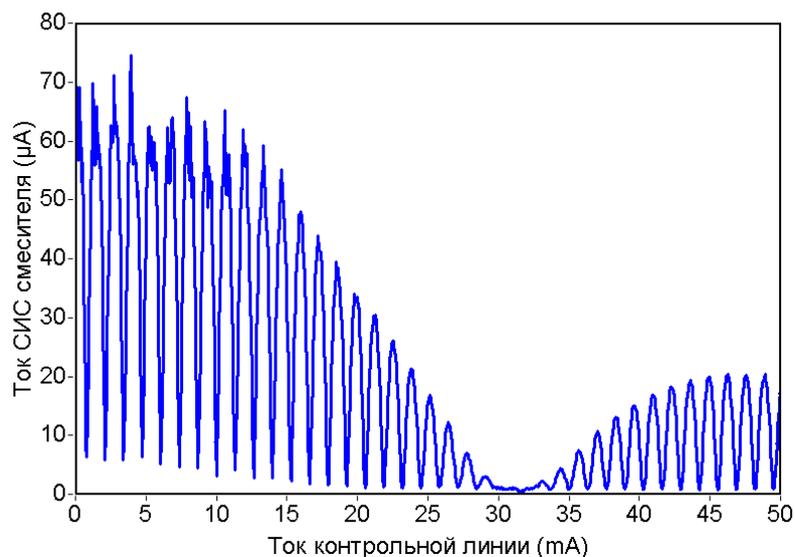


Рис 2.2. Характеристика подавления критического тока сдвоенного СИС перехода.

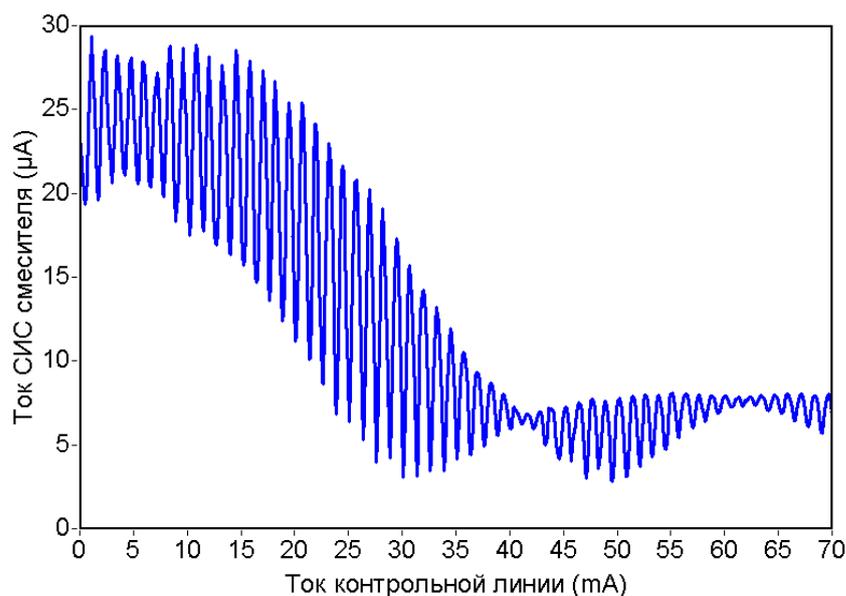


Рис 2.3. Пример подавления критического тока сдвоенного СИС перехода в случае захвата кванта магнитного потока в сверхпроводящей пленке вблизи СИС перехода.

В процессе работы с интегральным приемником была обнаружена зависимость параметров СИС перехода и чувствительности всего спектрометра от параметров сигнала опорного синтезатора, подаваемого на гармонический смеситель для работы системы ФАПЧ. Частота изменяется от

19 до 21 ГГц, а мощность, доходящая до микросхемы СИП, достигает единиц микроватт. Сигнал, приходящий на гармонический смеситель, может «просачиваться» на СИС и при достаточной мощности изменить форму ВАХ СИС смесителя (как изображено на рис. 2.4), что приводит к сужению рабочей области СИС смесителя по напряжению смещения. Необходимо отметить, что такое влияние заметно только для некоторых частот опорного синтезатора. Такая избирательность связана, скорее всего, с частотной зависимостью пропускания как СВЧ тракта, по которому сигнал опорного синтезатора подается на гармонический смеситель, но, главным образом, обусловлена взаимовлиянием сверхпроводниковых структур, связывающих компоненты приемника на микросхеме. Рабочую частоту опорного синтезатора необходимо выбирать с учетом вышеописанного воздействия. В случае, если невозможно минимизировать воздействие опорного синтезатора путем изменения его частоты, напряжение смещения СИС смесителя должно быть выбрано на невозмущенном участке ВАХ, для случая на рис 2.4 – между 2 и 3 мВ.

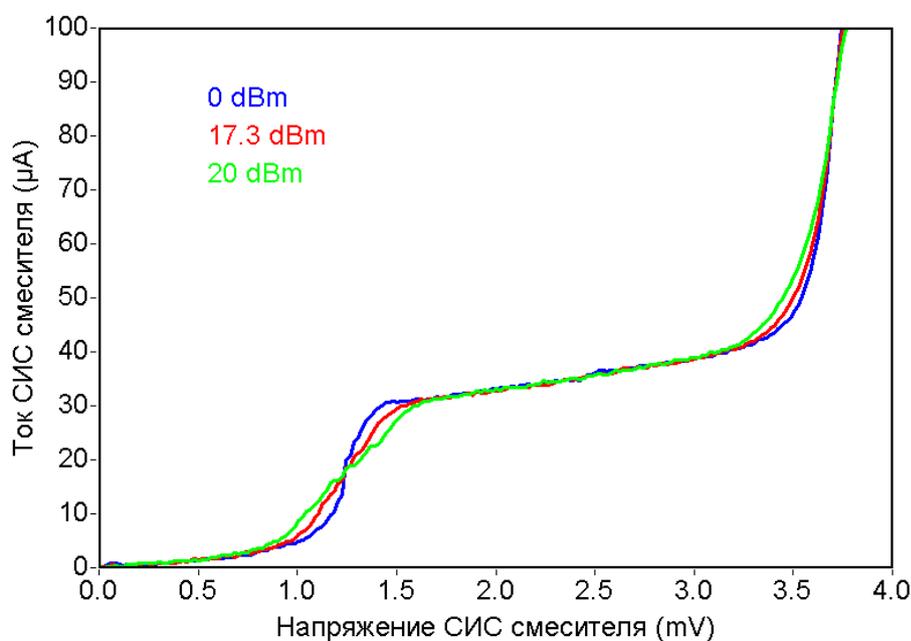


Рис. 2.4. ВАХ характеристики накачанного гетеродином СИС перехода, для разных значений мощности опорного синтезатора. Частота опорного синтезатора 19 ГГц, частота гетеродина 591 ГГц.

2.2. РДП, характеристики по постоянному току,

РДП является самой чувствительной частью интегрального приемника, любые изменения магнитного поля вблизи микросхемы приемника или температуры прибора приводят к изменению его характеристик, поэтому по форме его ВАХ или спектра излучения можно сделать вывод о захваченных приемником квантах магнитного потока, увеличению температуры системы (что приводит к деградации всех характеристик прибора) или появлению дополнительных наводок в цепях питания.

Для тестирования РДП снимается семейство ВАХ при различных магнитных полях и постоянном контроле величины тока накачки на СИС и гармоническом смесителе (НМ) в рабочей точке (см. рис. 2.5). У образцов на базе переходов Nb/AlN/NbN типичные диапазоны сканирования зависят от типа образца и составляют примерно 0 – 50 мА для тока смещения и 20 – 80 мА для тока контрольной линии. Для быстрого и удобного анализа накачка на СИС смесителе отображается цветом на ВАХ РДП (синий цвет соответствует отсутствию накачки, красный – накачке выше 25% от скачка тока на щели, что является близким к оптимальному значению для СИС).

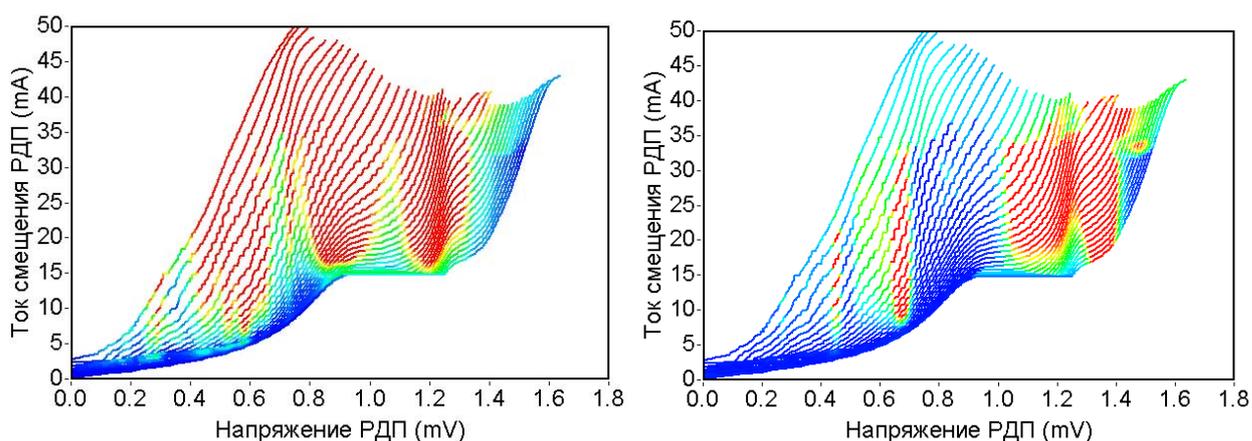


Рис 2.5. Семейство ВАХ РДП. В качестве третьей координаты (показана цветом)– на левом графике - накачка СИС смесителя, а на правом - гармонического смесителя.

Из-за квантовомеханических эффектов квазичастичный диссипативный ток через джозефсоновский переход, характеризующий затухание электромагнитной волны, зависит от напряжения рабочей точки, а также частоты и мощности падающего извне электромагнитного сигнала. Под действием этого сигнала растет ток нормальных электронов, переход накачивается. Собственная джозефсоновская генерация перехода также может приводить к эффекту «самонакачки» [52, 53], в результате чего образуются квазичастичные ступеньки при напряжениях $Vg/(2n+1)$. Для $n=1$ - первая ступень самонакачки возникает при $V_{JSC}=Vg/3$.

Напряжение V_{JSC} служит своеобразной границей, разделяющей две области: область ступенек Фиске с малым затуханием (ниже V_{JSC}) и режим безрезонансного движения вихрей (выше V_{JSC}), которые соответствуют различным значениям параметра затухания электромагнитной волны α , имеющего физический смысл нормальной проводимости туннельного барьера на единицу длины перехода. Когда квант магнитного потока сталкивается с краем перехода, часть электромагнитного излучения отражается обратно, при этом отраженная волна может в случае малого α достигнуть противоположного края. Тогда возникают стоячие волны, которые при определенных резонансных частотах облегчают вхождение в переход флаксонов, в результате чего ВАХ имеют ярко выраженную резонансную структуру. Чем меньше затухание, тем острее резонансные пики и круче ВАХ, которые называют ступеньками Фиске [54]. Эта ситуация соответствует первой рабочей области при напряжениях меньше V_{JSC} . [55, 56]. При напряжениях выше V_{JSC} происходит скачкообразное увеличение α , отраженные волны не достигают противоположного края перехода и ВАХ становятся более плавными; их наклон (дифференциальное сопротивление) увеличивается. Это облегчает непрерывную перестройку рабочей частоты РДП, но увеличивает ширину автономной линии генерации. Этот режим плотной цепочки вихрей часто называется флакс-флоу режимом, или режимом вязкого течения джозефсоновских вихрей [57, 58], когда расстояние между центрами соседних вихрей составляет порядка $2\lambda_J$. Параметр затухания плазменных колебаний α пропорционален плотности критического

тока j_c и нормальному подщелевому сопротивлению R_j . РДП может генерировать сигнал вплоть до напряжения порядка половины щелевого: $Vg/2 = \Delta/e$, когда энергия генерируемых квантов превышает энергию щели Δ , что приводит к разрыву куперовских пар и поглощению электромагнитной волны в электродах перехода.

На рис. 2.5 видно, что для РДП с большой плотностью тока ступеней Фиске на концах ВАХ нет. При токах смещения больших, чем приблизительно 33 мА РДП переходит в хаотический режим генерации, в котором отсутствует генерация линии излучения. Это ограничение верно для всех напряжений РДП, таким образом, и в режиме вязкого течения джозефсоновских вихрей нельзя использовать самые высокие значения тока смещения. Вероятно, это связано с тем фактом, что на конце ступени Джозефсоновские вихри (флаксоны) двигаются со скоростями, близкими к скорости Свайхарта [59], которая является максимальной скоростью флаксона в переходе. Из-за Лоренцевского сокращения флаксоны становятся намного меньше, чем расстояния между ними, становится возможным возбуждение внутренних мод колебаний внутри цепочки флаксонов, что приводит к широкополосной хаотической генерации.

Для исследования воспроизводимости параметров СИП проводился следующий эксперимент: на тестовом образце проводились измерения ряда зависимостей, затем образец отогревался, снова охлаждался до гелиевой температуры и процесс повторялся. Нагреватели, расположенные рядом с образцом, нагревали его до перехода образца в нормальное состояние, о чем судили по ВАХ СИС, измеряемой непрерывно. Каждый такой цикл (измерения, отогрев, охлаждение) назовем термоциклом, а эксперимент – термоциклированием. Целью было смоделировать возможные «уходы» параметров приемника. В качестве примера был взят наиболее чувствительный элемент приемника – РДП в области ступеней Фиске. Изменение параметров оценивалось по количеству ступеней Фиске на частоте РДП 495 ГГц в диапазоне токов смещения 15 – 37 мА. При

проведении примерно 30 термоциклов количество доступных ступеней в заданном диапазоне изменялось от 7 до 5, их положение по шкале токов смещения изменялось на 3 мА, а ВАХ при заданном токе контрольной линии сдвигались по напряжению РДП примерно на 25 мкВ, что соответствует сдвигу в 12 ГГц (см. рис. 2.6). Таким образом, несмотря на высокую устойчивость и воспроизводимость параметров СИП, в области резонансных ступеней Фиске необходимо производить поиск заданной ступени после каждого отогрева либо значительного изменения других параметров.

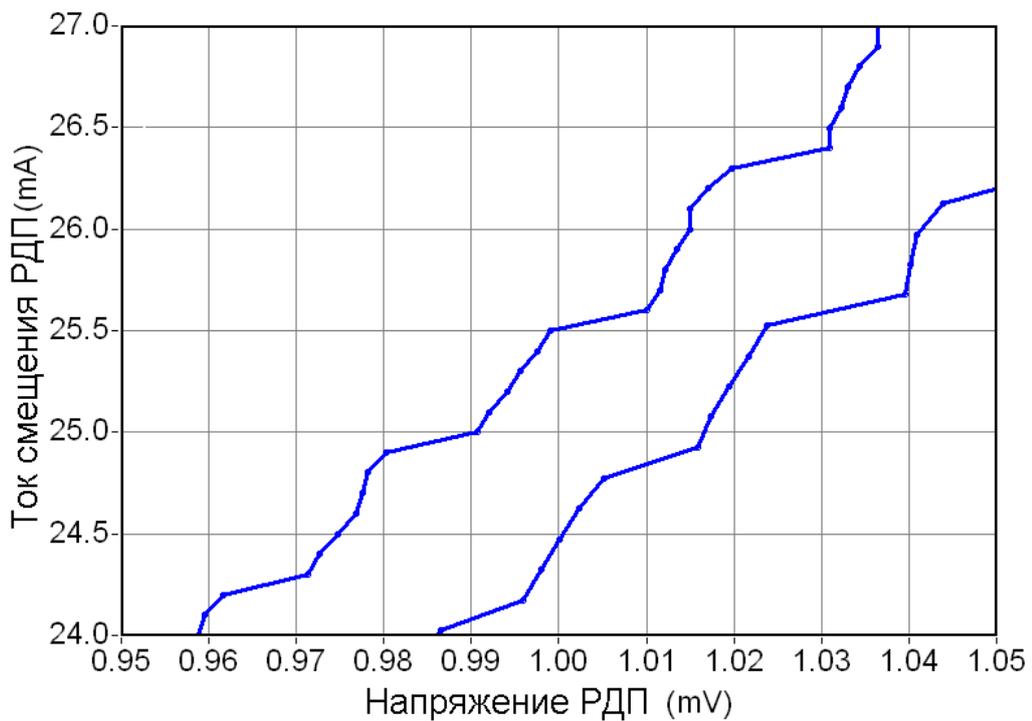


Рис. 2.6. ВАХ РДП, снятые при двух разных термоциклах. Ток контрольной линии РДП в обоих случаях равен 40 мА.

Ввиду большой площади РДП и его высокой чувствительности к внешнему полю вероятность того, что захваченный квант магнитного потока будет влиять на характеристики этого элемента, весьма велика. На рис. 2.7 представлен пример семейства ВАХ такого РДП. В случае «захвата» кванта магнитного потока вблизи РДП, на ВАХ возникают дополнительные изломы и скачки. Если такие изломы возникают в области, которая не используется

для работы, они не представляют проблем, но обычно они появляются в области ступеней Фиске и сильно сужают рабочий диапазон на частотах около 500 ГГц. Для устранения этой проблемы, обычно достаточно отогреть образец.

Однажды смесительный блок, находящийся внутри магнитного экрана, был случайно собран с применением намагниченных шайб. При каждом отогреве семейство ВАХ менялось непредсказуемым образом, что сделало невозможным контролируемое выставление частоты РДП. Чтобы избежать повторения такой ситуации была выработана процедура, по которой все элементы внутри экрана проверяются перед сборкой высокочувствительным магнитометром.

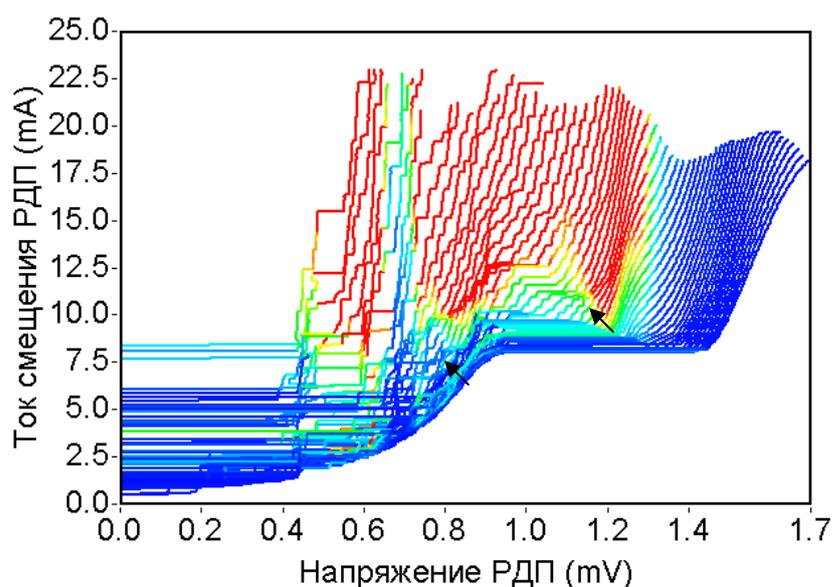


Рис. 2.7. Пример семейства ВАХ РДП с захваченным квантом магнитного потока. Обратите внимание на скачки и изломы ВАХ, отмеченные стрелками.

Изменение температуры микросхемы СИП изменяет, в первую очередь, ток утечки СИС и РДП. Если изменение температуры происходит в процессе работы, при заданной рабочей частоте РДП, это приводит к сдвигу всего семейства ВАХ, что при заданных токах смещения и контрольной линии приводит к изменению напряжения, а, значит, и частоты генерации, которое

можно легко отследить. В режиме ФАПЧ даже небольшое увеличение температуры образца приводит к росту сигнала фазовой ошибки. Таким образом, можно отслеживать очень незначительные изменения температуры прибора. К примеру, в процессе взлета инструмента TELIS, изменяется давление снаружи криостата, что приводит к изменению давления паров гелия в его гелиевом объеме (даже несмотря на установку специальных клапанов, поддерживающих постоянное давление), и, как следствие, к изменению температуры интегрального приемника и частоты генерации РДП. Изменение частоты генерации гетеродина в процессе подъема превышает несколько гигагерц, что не может быть компенсировано системой ФАПЧ и требует постоянной подстройки рабочей точки оператором.

2.3. Гармонический смеситель и система ФАПЧ

Гармонический смеситель (ГС), используемый для стабилизации частоты РДП, представляет собой одиночный СИС смеситель. В процессе проектирования СИП было решено отказаться от контрольной линии ГС, однако, как показали исследования, существуют особенности работы ГС как в квазичастичном, так и в джозефсоновском режимах. Специально для исследования этого явления были созданы тестовые образцы, в которых была реализована контрольная линия ГС, что позволило производить подавление критического тока. Результаты измерений такого образца представлены на рис. 2.8. На графиках изображена зависимость уровня сигнала ПЧ ФАПЧ (на частоте 400 ГГц при включенной системе ФАПЧ и синхронизации излучения РДП) от мощности сигнала опорного синтезатора и напряжения смещения ГС при подавленном (рис. 2.8 (а)) и неподавленном (рис. 2.8 (б)) критическом токе.

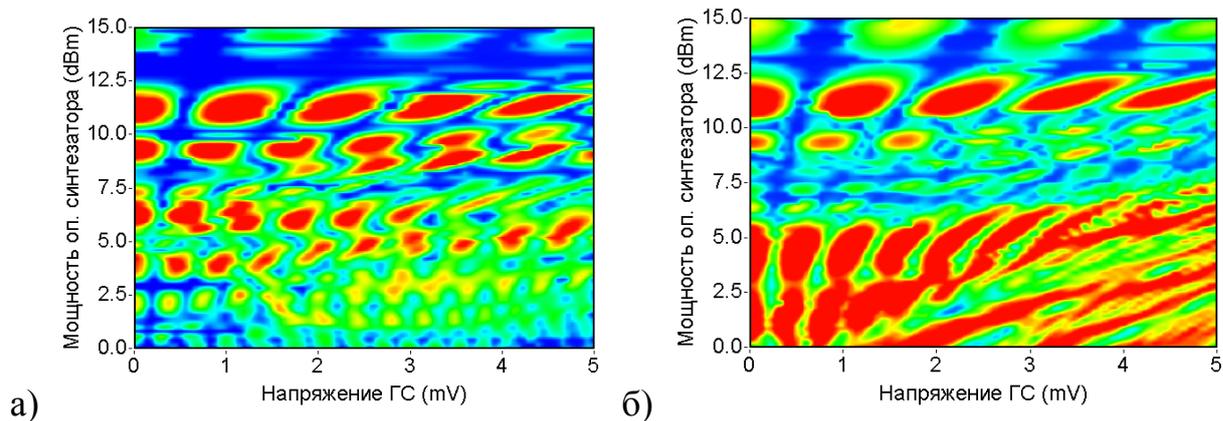


Рис 2.8. Зависимость сигнала ПЧ ФАПЧ от напряжения смещения ГС и мощности сигнала опорного синтезатора при подавленном (а) и неподавленном (б) критическом токе ГС.

Как видно из графиков, квазичастичный режим работы ГС достигается только при относительно большой мощности сигнала опорного синтезатора. Режим работы ГС весьма неустойчив – захват кванта магнитного потока может привести к подавлению критического тока и, как следствие, к изменению уровня сигнала ПЧ ФАПЧ. Например, можно увидеть разницу в положении пиков с максимальным уровнем ПЧ ФАПЧ при мощностях опорного синтезатора меньше 7 dBm до и после подавления критического тока током контрольной линии на рис. 2.8. С точки зрения управления и стабилизации РДП квазичастичный режим предпочтительнее, так как более широкие пики позволяют проводить быструю оптимизацию уровня ПЧ ФАПЧ в более широких пределах без потери стабилизации РДП. С другой стороны, уровень сигнала ПЧ ФАПЧ выше в джозефсоновском режиме, поэтому для некоторых частот возможна работа только в джозефсоновском режиме, иначе мощности сигнала недостаточно для работы системы ФАПЧ. Подобные зависимости индивидуальны для каждого образца, более того, они зависят от номера гармоники и частоты сигнала опорного синтезатора, однако их характер значительно не меняется со временем.

Как описано в п. 2.1, высокие значения мощности опорного синтезатора при некоторых значениях его частоты приводят к ухудшению

параметров приемного СИС смесителя. С другой стороны, в главе 3 будет показано, что при малых значениях мощности сигнала опорного синтезатора может происходить увеличение шумовой температуры приемника. Все эти факты необходимо учесть при настройке системы ФАПЧ. Вышеперечисленные факторы приводят к тому, что в процессе поиска оптимального рабочего положения системы необходимо проводить многопараметрическую оптимизацию системы ФАПЧ.

Для объяснения получаемых нелинейных зависимостей в нашей лаборатории было проведено теоретическое исследование работы гармонического смесителя [37]. В результате найдена зависимость мощности сигнала промежуточной частоты от параметров входных сигналов и напряжения смещения на гармоническом смесителе и получено качественное и удовлетворительное количественное совпадение экспериментальных данных с теоретическими.

2.4. Выводы главы

Применение сложного прибора, создание системы управления им невозможно без глубокого понимания физики происходящих в нем процессов. Поэтому были проведены обширные исследования всех составных частей прибора, их характеристик и взаимосвязи друг с другом, описанные в этой главе. Задача создания конечного прибора, надежно работающего в сложных условиях, причем с дистанционным управлением по радиоканалу в условиях строго ограниченного времени настройки и лимитированных возможностей для воздействия, потребовала проведения дополнительных проверок на устойчивость к внешним воздействиям, повторяемость основных характеристик.

Изучение свойств СИП, проведенное в данной главе позволяет сделать следующие выводы:

- 1) СИС смеситель или РДП при охлаждении до рабочей температуры могут захватить квант магнитного потока, что потребует отогрева

образца для восстановления работоспособности прибора. Отработаны алгоритмы и процедуры такого отогрева, что позволяет восстанавливать работоспособность устройства за десятки секунд.

- 2) Сигнал опорного синтезатора гармонического смесителя на некоторых частотах искажает форму ВАХ СИС. Требуется контролировать свойства ВАХ СИС смесителя при выборе его рабочей точки и параметров сигнала опорного синтезатора.
- 3) ВАХ РДП значительно изменяются при термоциклировании, соответственно и частота генерации может изменяться на величину до 12 ГГц для разных термоциклов. Это приводит к требованию при каждом охлаждении до рабочей температуры заново определять рабочую точку РДП для заданной частоты генерации.
- 4) Зависимость сигнала ПЧ ФАПЧ от частоты и мощности сигнала опорного синтезатора имеет ярко выраженный нелинейный характер. Необходимо производить многомерную оптимизацию этого параметра с учетом влияния сигнала опорного синтезатора на СИС.

3. Оптимизация чувствительности и спектральных характеристик СИП

Две наиболее важные характеристики любого спектрометра – его спектральное разрешение и чувствительность. Как упоминалось ранее, чувствительность СИП, благодаря использованию СИС перехода в качестве смесителя, близка к квантовому пределу. В то же время, высокая степень интеграции прибора привела к тому, что характеристики отдельных его частей, зависят друг от друга, например, рабочая точка, оптимальная по спектральным характеристикам (минимальная ширина линии генерации РДП) не всегда является лучшей с точки зрения чувствительности (СИС смеситель не в оптимальном режиме). Была поставлена сложная задача создать процедуры поиска оптимальной рабочей точки для заданной частоты гетеродина, удовлетворяющая требованиям как к спектральному разрешению, так и к чувствительности спектрометра.

В данной главе описываются исследования, результаты которых позволили создать наиболее полную картину взаимодействия всех частей СИП, и с ее учетом разработать алгоритмы поиска оптимальной рабочей точки.

Также в данной главе описаны механизмы и результаты влияния на основные характеристики спектрометра внешних факторов – температуры микросхемы, нестабильности управляющей электроники.

3.1. Оптимизация спектральных характеристик СИП.

В идеальном приемнике спектр гетеродина должен иметь форму δ – функции, чтобы понижение частоты сигнала, принимаемого антенной, проходило без искажений спектра последнего. Однако, линия излучения РДП имеет конечную ширину и фазовые шумы. Если РДП находится в режиме частотной стабилизации, то спектральное разрешение СИП равно ширине

автономной линии, которая может достигать нескольких МГц в зависимости от рабочей частоты РДП [A1, A2, A21]. При использовании фазовосинхронизированного РДП (ФС РДП), предельное спектральное разрешение в принципе лимитируется качеством опорного осциллятора системы ФАПЧ и опорного генератора для ГС. В СИП спектральное разрешение в режиме фазовой синхронизации может достигать 10 кГц [38,39]. Однако, например, для проекта TELIS, ввиду использования на выходе ПЧ автокоррелятора, оно определяется его аппаратной функцией и равно 2.4 МГц [40] (этого было достаточно для решения поставленных задач по исследованию спектров газов в атмосфере). Для детектирования близко расположенных линий и определения формы одиночной узкой линии, а также для задач, где нужно знать фазу принимаемого сигнала (например, в интерферометрии), необходимо использовать режим фазовой синхронизации РДП.

В режиме фазовой синхронизации нет смысла говорить о ширине линии излучения – отличие формы сигнала гетеродина от δ – функции приводит к искажению формы принимаемых спектральных линий и увеличению фазового шума ФС РДП; причем исследования показали, что спектральное качество является хорошим показателем качества преобразования – чем выше СК, тем меньше искажения при приеме сигнала. Спектральное качество сигнала фазово-синхронизированного РДП, определяется как непосредственно автономной шириной линии генерации РДП, так и результатами настройки системы ФАПЧ (см. пункт 2.3).

Ранее упоминалось, что РДП имеет две основные области работы – область вязкого течения джозефсоновских вихрей и резонансную область ступеней Фиске. В области ступеней Фиске достигается наименьшая ширина линии излучения РДП, однако сложный характер ВАХ сильно затрудняет управление РДП в этой области. С другой стороны, в области вязкого течения флаксонов ширина линии излучения далека от рекордной, однако из-за отсутствия резонансной структуры, управление РДП в этой области

возможно простым изменением тока контрольной линии при постоянном токе смещения.

Автономная ширина линии излучения РДП зависит от рабочей точки и, в первую очередь, от дифференциального сопротивления R_d , которое определяет связь между токовыми шумами и шумами по напряжению, от которых, в свою очередь зависит ширина линии. Эмпирически было установлено, что зависимость ширины линии излучения от параметров рабочей точки имеет следующий вид [41, 42]:

$$\Delta f = \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi}{\Phi_0} \right)^2 (R_d + KR_d^{cl})^2 \left[\frac{e\bar{I}_N}{2} \coth \frac{e\bar{V}}{2k_B T} + e\bar{I}_s \coth \frac{e\bar{V}}{k_B T} \right], \text{ где}$$

$$R_d^{cl} = \frac{\partial V}{\partial I_{cl}} \quad - \text{ дифференциальное сопротивление по каналу тока}$$

контрольной линии, $R_d = \frac{\partial V}{\partial I_b}$ - дифференциальное сопротивление по току

смещения, \bar{I}_N - ток нормальных носителей, \bar{I}_s - ток сверхпроводящих носителей (куперовских пар).

Для исследования спектральных характеристик РДП в области ступеней Фиске было измерено семейство ВАХ РДП с высоким разрешением (см. рис. 3.1). Для наглядности на данном графике отсутствуют линии, соединяющие измеренные точки вольт-амперных характеристик; показаны только реализуемые на практике рабочие точки.

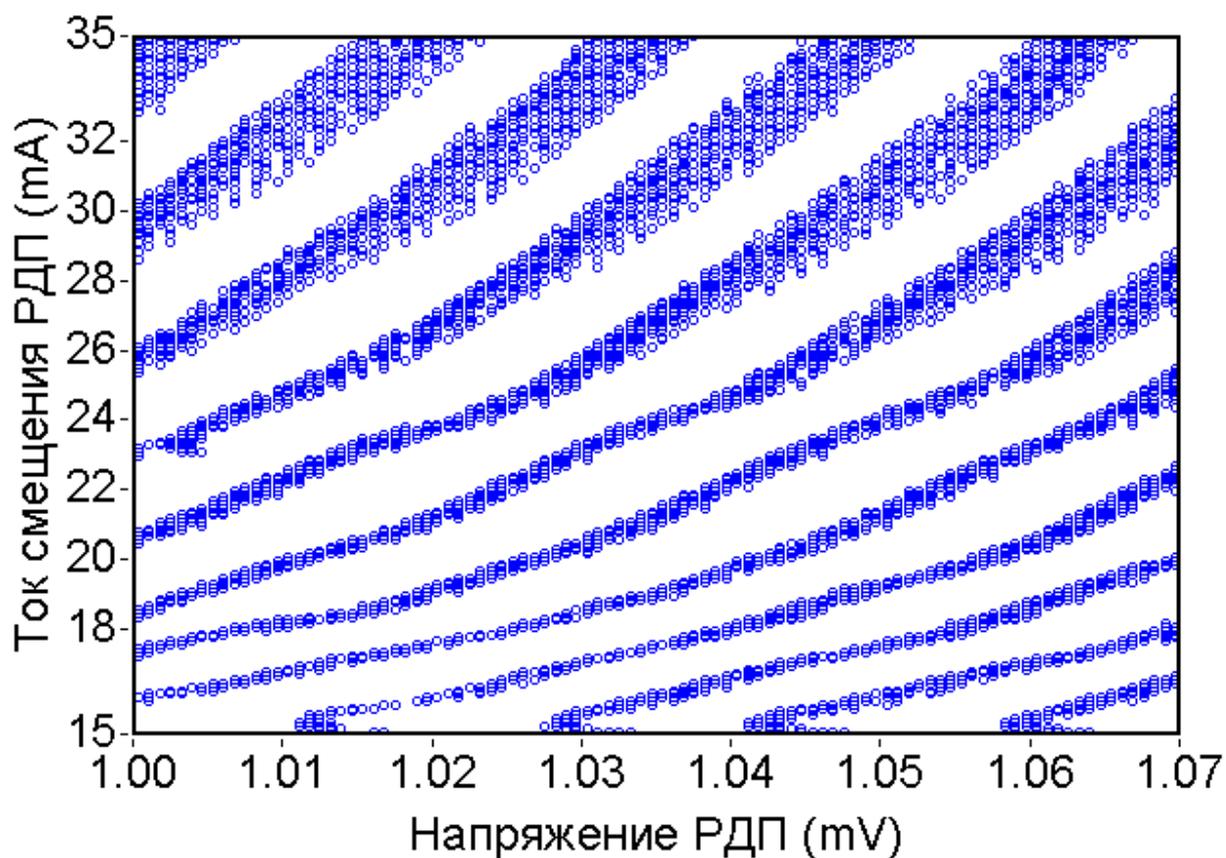


Рис 3.1. Увеличенный участок ВАХ РДП в области ступеней Фиске.

Хорошо видны области, где отсутствуют рабочие точки между ступеней Фиске - при попытке плавной перестройки частоты рабочая точка перескакивает на другую ступень. Диапазон непрерывной перестройки частоты изменением управляющих токов ограничен одной ступенью Фиске и составляет несколько гигагерц. Однако, даже в пределах одной ступени, ширина линии генерации РДП значительно изменяется.

Были проведены исследования параметров генерации РДП на одной ступени Фиске – зависимость ширины линии излучения от положения рабочей точки. На рис. 3.2 представлены ВАХ РДП в области одной ступени Фиске, измеренные с максимальным разрешением. Отметим, что измерения проводились при малом токе смещения, где ширина линии излучения РДП существенно превосходит значения в рабочем диапазоне токов (порядка 1 МГц), однако характер зависимостей полностью сохраняется.

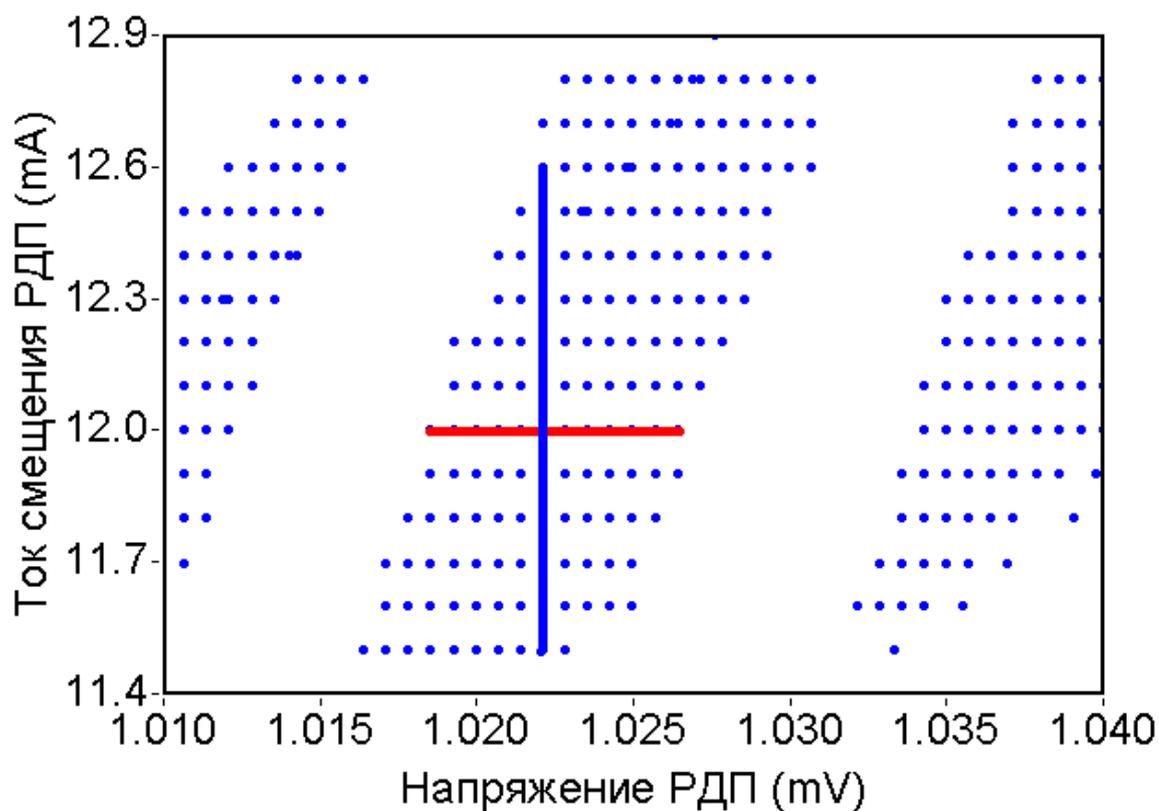


Рис 3.2. Участок ВАХ РДП в области одной ступени Фиске.

На рис. 3.3 представлены измерения ширины линии излучения РДП, измеренные при постоянном токе смещения (сканирование вдоль горизонтальной красной линии на рис. 3.2).

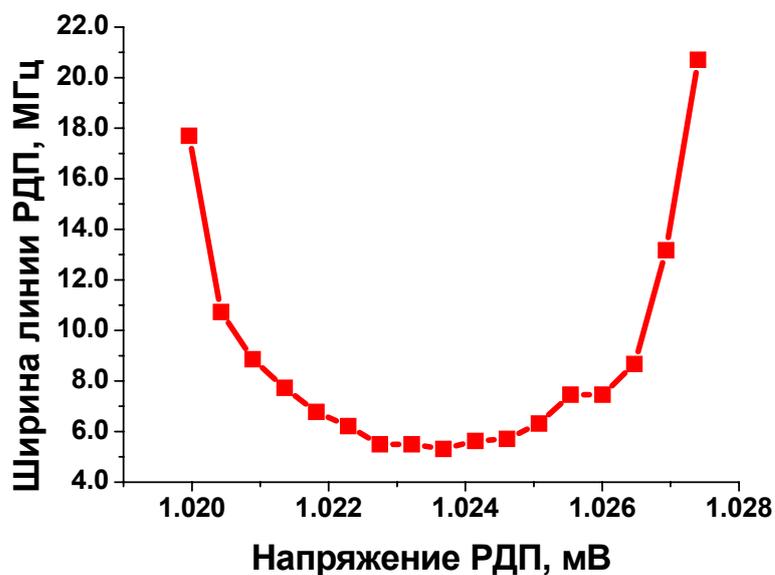


Рис 3.3. Зависимость ширины линии излучения РДП от частоты.

На рис. 3.4 представлены результаты измерения ширины линии излучения РДП измеренные при постоянном напряжении РДП и изменении тока смещения (сканирование вдоль вертикальной синей линии на рис. 3.2).

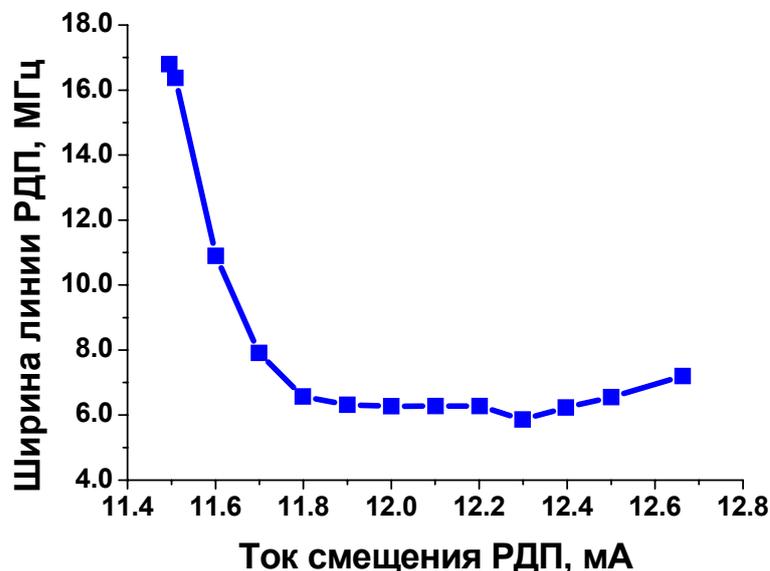


Рис 3.4. Зависимость ширины линии излучения РДП от тока смещения.

Как видно из измерений, ширина линии излучения РДП сильно изменяется в пределах одной ступени, и минимальна в геометрическом центре. С точки зрения управления необходимо установить рабочую точку РДП ровно в центр ступени. Стоит отметить, что общая структура ступеней Фиске сохраняется при изменении внешних параметров, однако из-за высокой чувствительности прибора, положение ступеней изменяется даже при варьировании давления. Это приводит к необходимости заново производить поиск ступени и ее центра при каждом охлаждении и любом значимом изменении внешних параметров. Для этих целей А.Б. Ермаковым совместно с автором был разработан алгоритм быстрого поиска и выставления заданной частоты РДП на ступенях Фиске.

В качестве входных параметров используются требуемая частота РДП и примерный диапазон по токам управления РДП, в котором находится искомая рабочая точка. Скорость поиска зависит от входных данных –

уменьшая область поиска рабочей точки, мы резко сокращаем время работы алгоритма.

Первый этап работы алгоритма заключается в определении диапазона поиска нужной ступени Фиске – производится сканирование по току контрольной линии РДП при заданном токе смещения – определяются левая и правая границы ступени. Рассчитывается начальная точка для следующего сканирования.

Второй этап – анализ полученного участка ВАХ – определение «удаленности» найденной ступени от требуемого напряжения РДП. Исходя из этого, определяется шаг по току смещения для следующего сканирования. Таким образом, сокращается время наблюдения – в области, где по каким-то причинам отсутствуют ступени Фиске (к примеру, из-за захвата кванта магнитного потока и последующего нарушения периодической структуры ВАХ) снимается меньшее количество ВАХ, как следствие, сильно уменьшается время поиска.

Третий этап – определение середины ступени Фиске, попадающей в заданный интервал вокруг искомого напряжения РДП и выставление соответствующего значения тока контрольной линии РДП.

Все изменения тока контрольной линии РДП при сканированиях производятся в одном направлении для того, чтобы избежать влияния гистерезиса.

Данный алгоритм разработан с учетом необходимости автономной работы на борту аэростата – без контроля со стороны оператора. В результате его исполнения с упомянутыми выше входными данными происходит надежное выставление оптимальной рабочей точки в середине ступени Фиске за несколько десятков секунд.

В области вязкого течения джозефсоновских вихрей данный алгоритм также работает, но из-за отсутствия периодической структуры ВАХ находит оптимальное значение при первом же сканировании.

Для управления СИП, особенно в области ступеней Фиске, необходимо точно знать напряжение РДП. Ширина ступени Фиске составляет около $10 \mu\text{В}$, но так как рабочая точка должна находиться как можно ближе к геометрическому центру ступени, необходимо иметь возможность измерять напряжение с точностью не хуже $1 \mu\text{В}$ (500 МГц по шкале частот). Описанная выше процедура поиска и выставления частоты гетеродина на ступени Фиске использует для своей работы напряжение РДП, а, следовательно, если напряжение РДП измеряется с некоторым сдвигом, найденная рабочая точка на нужной частоте РДП может оказаться на границе ступени Фиске (что приведет к существенному увеличению ширины линии излучения РДП) или даже между ступеней. Для режима вязкого течения джозефсоновских вихрей ошибка по частоте не столь критична, но может сделать невозможной работу процедуры настройки системы ФАПЧ, что создаст большие проблемы в случае удаленного управления.

Во-первых, следует отметить, что мы можем определить действительную частоту (а, следовательно, и напряжение) РДП в режиме фазовой синхронизации – зная частоту опорного синтезатора и номер используемой гармоники (также необходимо учесть сдвиг, обусловленный системой понижения частоты, и опорную частоту системы ФАПЧ). Как показали измерения, эта величина заметно отличается от напряжения, измеренного полетной электроникой.

Были обнаружены две причины такой ошибки в измерении напряжения:

- 1) существует некоторый коэффициент между действительным и измеряемым напряжением, объясняемый несовершенством калибровок АЦП управляющей электроники;

- 2) измеряемое значение напряжения зависит от тока контрольной линии РДП.

На втором пункте следует остановиться подробнее. Было установлено, что измеряемое напряжение РДП (даже при нулевом токе смещения – т.н.

офсет по напряжению) зависит от тока контрольной линии РДП – при приложении тока измеряемое напряжение уменьшается (см. рис. 3.5). Было доказано, что данная проблема обусловлена особенностями полетной электроники – офсет возникал даже когда вместо криостата была подключена тестовая нагрузка. Установлено, что этот сдвиг возникает из-за 32 Ом резистора в цепи измерения тока контрольной линии РДП на плате задания токов РДП в полетной электронике. При пропускании через него тока 50-80 мА он разогревается и на плате возникает термо-ЭДС, которая и вызывает изменение измеряемого напряжения.

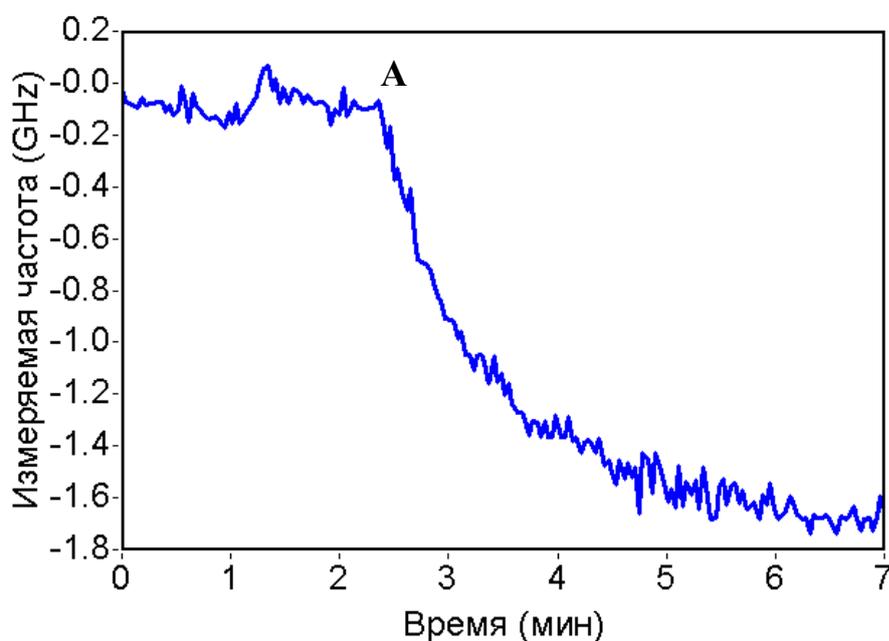


Рис. 3.5. Зависимость напряжения РДП от времени. Ток смещения РДП равен 0 мА, в точке А был приложен ток контрольной линии РДП, равный 80 мА.

Из этой картины также виден временной масштаб изменений – системе требуется около 3 минут для того, чтобы прийти в равновесие. Таким образом, после установки рабочей точки РДП необходимо подождать как минимум 3 минуты для стабилизации напряжения. Также было обнаружено, что офсет, измеренный при заданных рабочих токах смещения РДП, линейно зависит (в рабочей области 40 – 65 мА) от тока контрольной линии,

коэффициент примерно равен -0.0139 ГГц/мА. Это значит, что при перестройке РДП в рабочей области изменение офсета не превышает 230 МГц, а, следовательно, не обязательно заново измерять офсет после каждой перестройки РДП.

3.2. Оптимизация шумовой температуры СИП

Чувствительность СИП оценивалась путем измерения эквивалентной шумовой температуры приемника. Измерялся отклик прибора при переключении температуры нагрузки на входе прибора между комнатной температурой и температурой жидкого азота. Отклик измерялся в канале тракта ПЧ, частотный диапазон сигнала 4 – 8 ГГц.

Для пересчета отклика прибора в шумовую температуру использовалась следующая формула:

$$T_n = \frac{T_H - Y \cdot T_C}{Y - 1},$$

где T_H , К – температура горячей нагрузки, T_C , К – температура холодной нагрузки, Y – отношение уровней отклика прибора при переключении нагрузки, так называемый Y -фактор, фактически, обратно пропорциональный шумовой температуре. В дальнейшем для оценки чувствительности приемника будет использоваться как шумовая температура, так и Y -фактор.

Чувствительность СИП определяется в первую очередь режимом работы СИС смесителя. Она зависит от частоты приема, что обусловлено характеристиками приемной антенны, которые не равномерны в рабочем диапазоне приемника (450 – 700 ГГц). Также чувствительность зависит от рабочей точки гетеродина – мощность его генерации, а, как следствие, и накачки СИС смесителя не постоянны в рабочем диапазоне гетеродина. Свою роль вносит и зависимость от частоты параметров согласующих элементов, находящихся на чипе СИП.

При предварительном тестировании микросхемы СИП измеряется зависимость шумовой температуры приемника от рабочей точки гетеродина.

Характер такой зависимости понятен из рис. 3.6, на котором изображен Y-фактор при различных значениях токов смещения и управления РДП. По этой зависимости определяются диапазоны с максимальным Y-фактором (минимальной шумовой температурой) для всех рабочих частот, а затем строится интегральная зависимость шумовой температуры от частоты принимаемого сигнала (рис. 3.7).

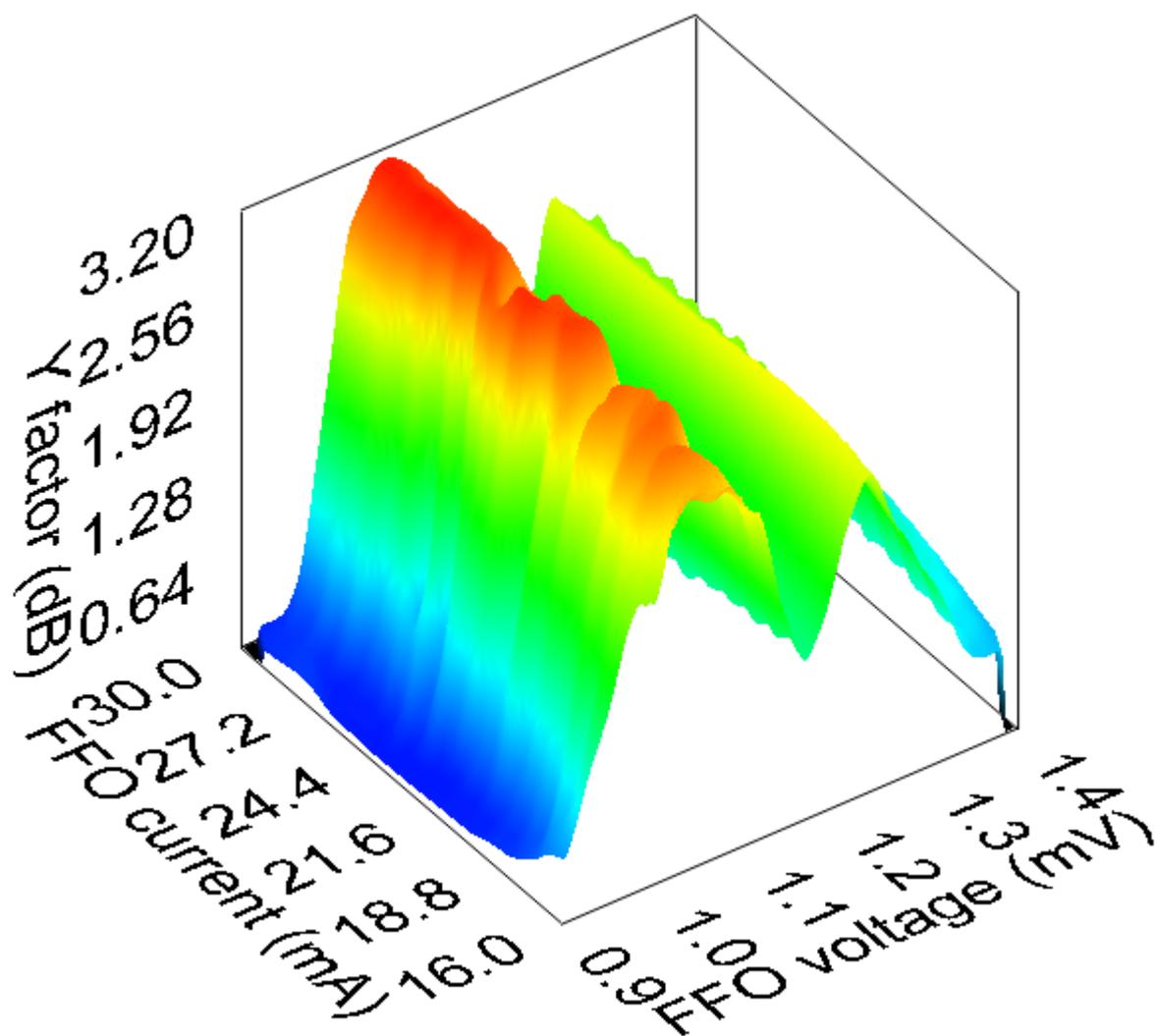


Рис. 3.6. Зависимость Y-фактор от рабочей точки РДП.

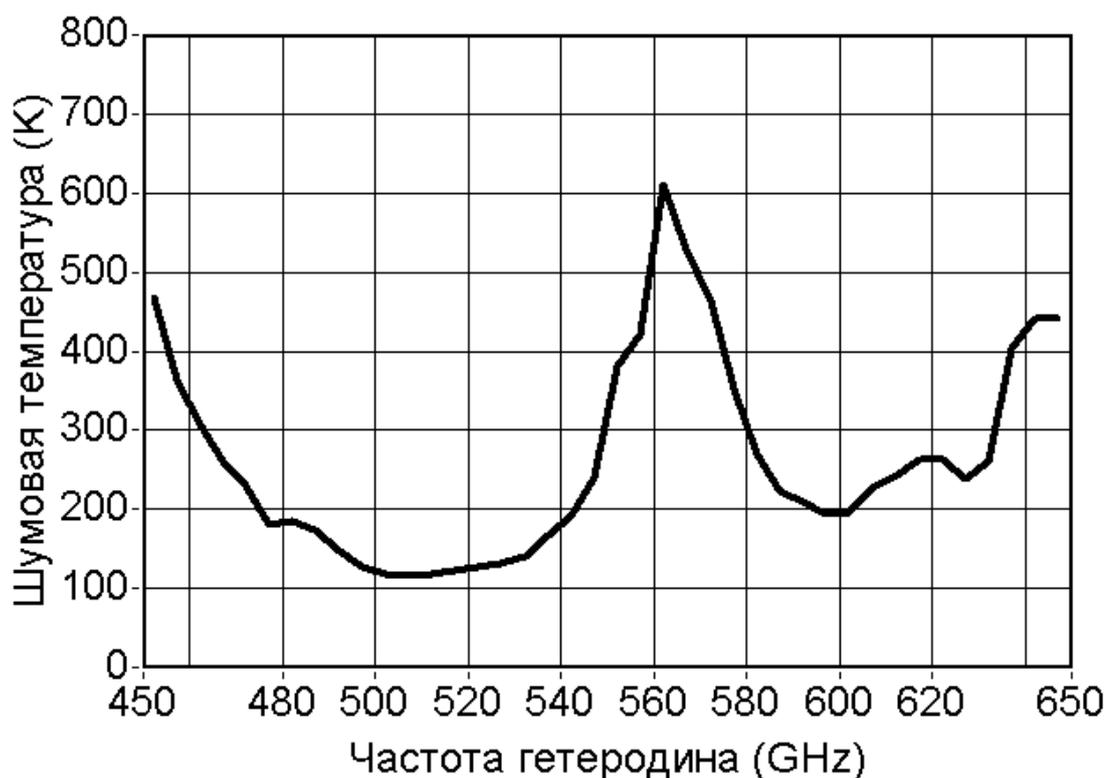


Рис. 3.7. Зависимость шумовой температуры от частоты гетеродина.

На этом оптимизация шумовой температуры не заканчивается. Далее работа продолжается для конкретной рабочей частоты гетеродина – выбирается рабочая точка на ВАХ РДП, с учетом сразу двух факторов – ширины линии излучения (см. п. 3.1) и шумовой температуры приемника. Следующим шагом устанавливается рабочая частота гетеродина. При этом задается ток контрольной линии РДП, создающий магнитное поле в области РДП. Это также изменяет магнитное поле вблизи СИС смесителя, и нарушает подавление критического тока, о котором шла речь в п. 2.1. Однако проверить качество подавления критического тока простым измерением тока СИС смесителя уже практически невозможно – на фоне накачки гетеродином заметить изменение тока весьма сложно. Поэтому производят измерение зависимости шумовой температуры от напряжения смещения смесителя. Плохо подавленный критический ток приведет к появлению пиков при напряжениях, кратных напряжению РДП (рис. 3.8), обусловленных не

подавленных до конца эффектом Джозефсона. Далее производится минимизация этого эффекта путем варьирования в малых пределах (1-2 мА) тока контрольной линии СИС смесителя (рис. 3.9). Для ускорения процедуры оптимизации для этого измеряется не Y -фактор, а мощность сигнала ПЧ на выходе при неизменном сигнале (горячей или холодной нагрузке) на входе. Критический ток проявляется в виде дополнительного сигнала, зависящего от тока в линии, задающей магнитное поле. Следует отметить важность предварительного подавления критического тока – если при окончательной минимизации критического тока значительно изменять ток контрольной линии СИС смесителя, изменится и магнитное поле вблизи РДП, а вместе с ним изменится и частота гетеродина.

После окончательного подавления критического тока производится проверка формы зависимости шумовой температуры от напряжения смещения смесителя и по этому графику выбирается рабочая точка СИС смесителя – точка, в которой шумовая температура и влияние критического тока минимальны.

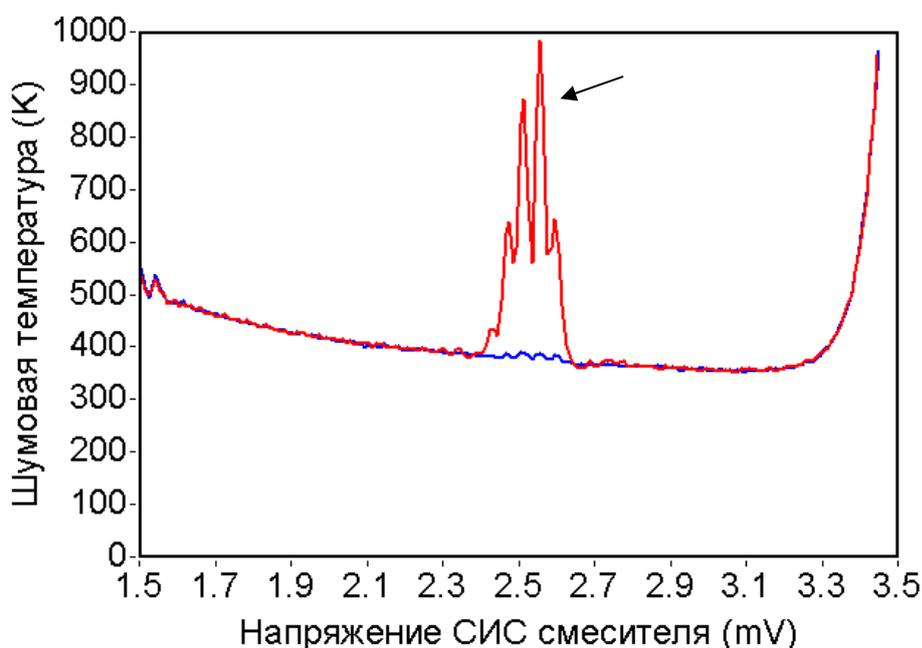


Рис. 3.8. Зависимость шумовой температуры от напряжения смещения СИС смесителя. Стрелкой отмечен пик, обусловленный плохим подавлением критического тока.

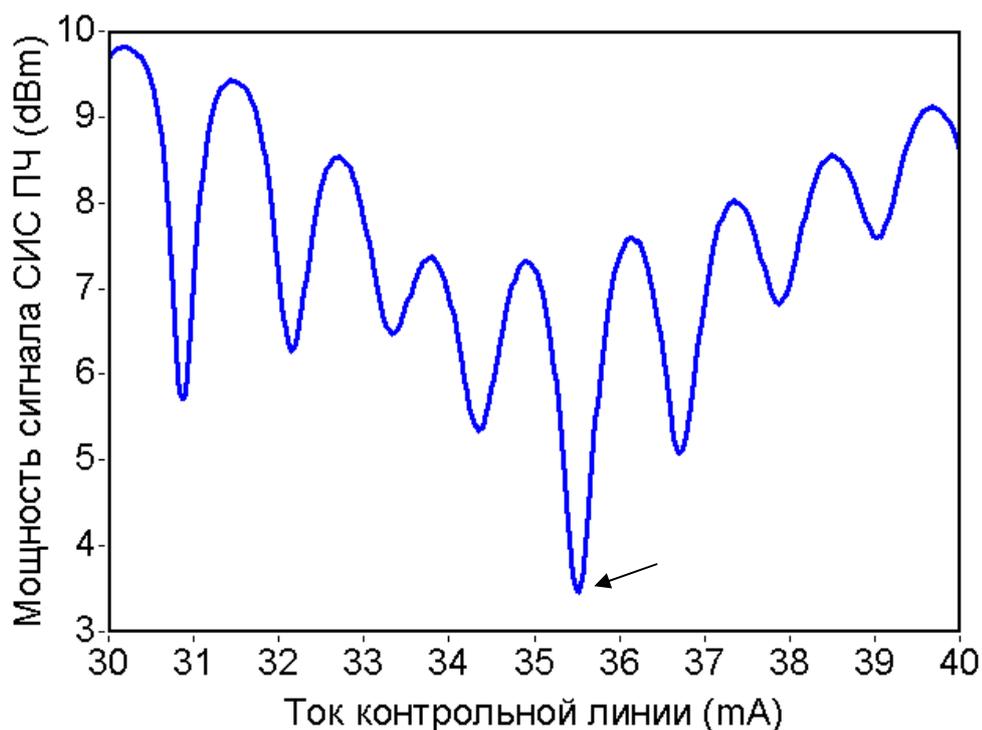


Рис. 3.9. Подавление критического тока СИС смесителя, используя сигнал ПЧ. Стрелкой отмечена лучшая точка.

При проведении предполетных исследований интегральных характеристик СИП было обнаружено дополнительное влияние на шумовую температуру напряжения смещения ГС и параметров сигнала опорного синтезатора. Предположительно, механизм воздействия таков: джозефсоновская генерация ГС является источником широкополосного шума, который поступает на СИС смеситель по СВЧ тракту, предназначенному для передачи сигнала РДП на СИС и гармонический смеситель. На рис. 3.10 представлена зависимость Y-фактор от напряжения смещения гармонического смесителя и мощности сигнала опорного синтезатора. Масштаб изменения Y-фактор от рабочей точки не очень велик – в худших точках (синий цвет) Y-фактор равен 1.6 dB, в лучших (красный цвет) – 1.9 dB, соответственно, шумовая температура изменяется от 300 до 400 К.

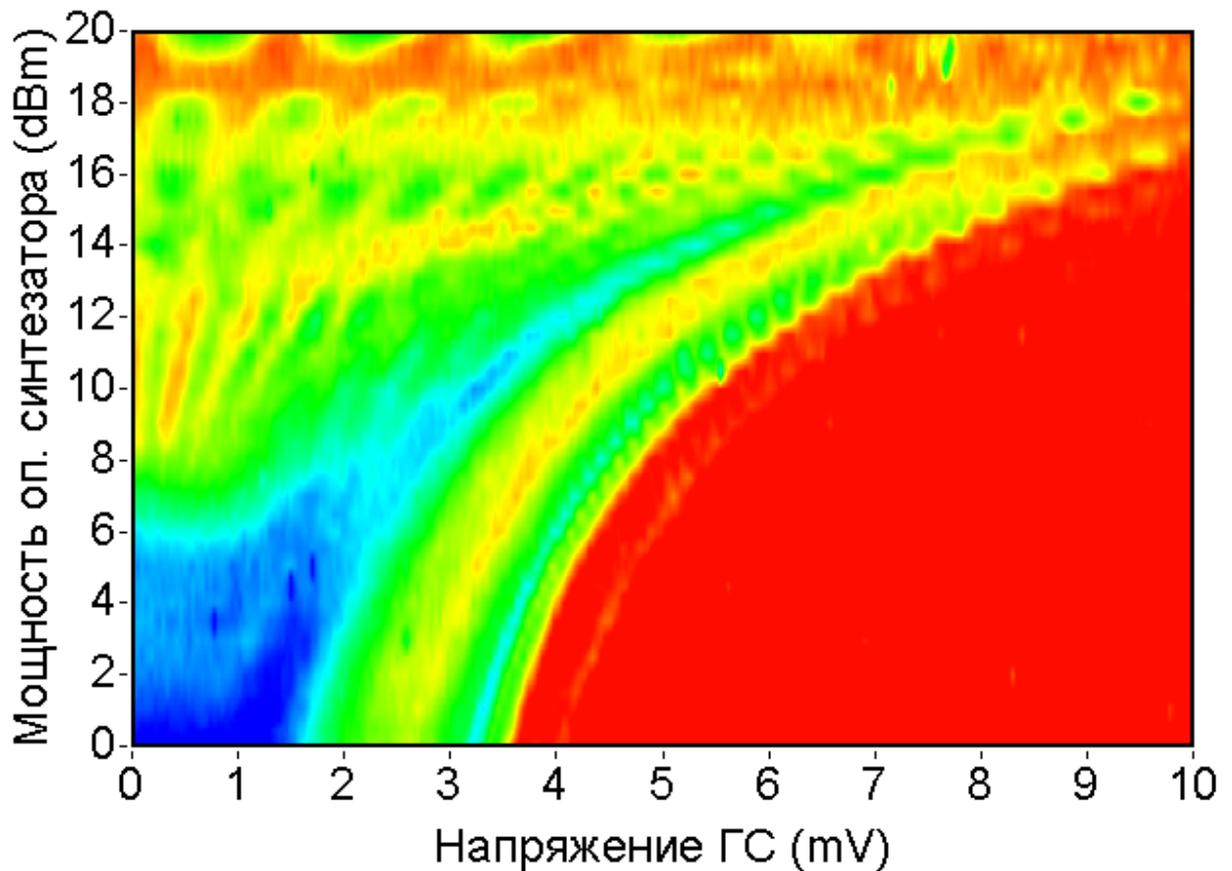


Рис 3.10. Зависимость Y-фактор (показан цветом) от напряжения ГС и мощности опорного синтезатора.

Форма зависимости напоминает таковую для уровня сигнала ПЧ ФАПЧ (см. пункт 2.3) для джозефсоновского и квазичастичного режимов – дополнительный шум присутствует только в области джозефсоновской генерации. Приведенная выше зависимость изменяется при изменении частоты опорного синтезатора, что, вероятно, связано с частотной зависимостью пропускания тракта между опорным синтезатором и ГС.

Интегральная шумовая температура спектрометра определяется шумами не только приемного элемента, но и шумами усилителей промежуточной частоты и прочих компонентов сложной системы. В нашем случае выходной сигнал системы – выход ПЧ приемного элемента (СИС смесителя) диапазона 4-8 ГГц. Основной вклад в шумы непосредственно

приемного элемента дает дробовый шум носителей заряда, зависящий от тока, протекающего через элемент. В том случае, когда это единственный источник шума в системе, шумы уменьшаются с увеличением времени накопления сигнала, как описывается следующей формулой:

$$\sigma = \frac{\langle x(t) \rangle}{\sqrt{B * \tau_{\text{int}}}}$$

Где σ – стандартное отклонение измеряемого сигнала, $\langle x(t) \rangle$ - среднее значение измеряемого сигнала, B – ширина полосы интегрирования (полосы ПЧ в общем случае), и τ_{int} – время интегрирования.

Тем не менее, на практике шумы сложной системы являются суперпозицией дробового шума, фликкер ($1/f$) шума и медленных низкочастотных изменений параметров системы (уход параметров). Причем, если фликкер шум не зависит от времени интегрирования, то медленное изменение параметров приводит к увеличению ошибки измерения при увеличении периода интегрирования. Таким образом, возникает необходимость определить оптимальное время интегрирования сигнала за один период наблюдения. Для решения этой задачи был применен метод вариации Аллана [43, 44]. Суть его заключается в построении графика зависимости среднеквадратичного отклонения измеряемой величины (σ_A^2 – вариация Аллана) от времени интегрирования. Минимум полученной характеристики является оптимальным временем усреднения (интегрирования) сигнала при проведении измерений.

Для построения такой зависимости производится измерение исследуемой величины с максимально возможной частотой дискретизации (продолжительность каждого измерения t_0) в зависимости от времени. Полученный ряд значений $x_1, x_2, x_3 \dots x_n$ может быть разбит на группы по k измерений в каждой. В пределах каждой группы производится усреднение и получается ряд $\langle x \rangle^k$. Для этого ряда вычисляется среднеквадратичное отклонение. Получаем $\sigma_A^2(\tau) = \sigma_A^2(k * t_0)$. Затем изменяем k и проделываем

все заново. Таким образом, получается зависимость σ_A^2 от размера группы, в пределах которой производится интегрирование, то есть от времени интегрирования:

$$\sigma_A^2(\tau) = \frac{1}{2 * p} \sum_{j=1}^p [y_{j+1}(\tau) - y_j(\tau)]^2,$$

где y – среднее значение величины среди k значений группы, p – количество групп из k значений в каждой, которое можно получить из проведенных n измерений [45].

Большим достоинством сверхпроводникового интегрального спектрометра по сравнению со спектрометрами с внешним гетеродином является его стабильность и невосприимчивость к чисто механическим колебаниям системы. К примеру, стоячие волны между окнами криостата в канале задания гетеродина приводят к модуляции мощности сигнала гетеродина, поступающего на приемный элемент при любых механических воздействиях на криостат. В результате оптимальное время интегрирования таких инструментов редко превышает 1 секунду. Для СИП в составе инструмента TELIS это время составляет несколько десятков секунд [46] при полосе шумов 17 МГц. Время, в течение которого производится одно измерение в процессе полета инструмента TELIS, не превышает 1.5 секунд, а ширина одного спектрального канала цифрового автокоррелятора, являющегося оконечным спектрометром, составляет 2.4 МГц.

Были проведены аналогичные исследования стабильности СИП в лабораторных условиях. В процессе их выполнения было обнаружено, что на конечный результат могут влиять множество факторов, к примеру, если не использовать систему температурной стабилизации усилителей ПЧ, оптимальное время интегрирования сокращается в несколько раз по причине колебания их температуры, а, следовательно, и коэффициента усиления. Отсутствие стабильности даже в самом, казалось бы, незначительном элементе приводят к резкому ухудшению стабильности системы в целом.

Лабораторные измерения, результат которых представлен на рис. 3.11, были проведены с использованием FFTS (Fast Fourier Transform Spectrometer), спектрометра на быстром преобразовании Фурье, в качестве окончательного спектрометра. Измерялась мощность в одном спектральном канале спектрометра, то есть, ширина полосы измеряемых шумов, составляла 183 КГц. Красным цветом на графике показана кривая, демонстрирующая уменьшение шумов системы с увеличением времени интегрирования, если бы в системе присутствовал только дробовый шум носителей заряда.

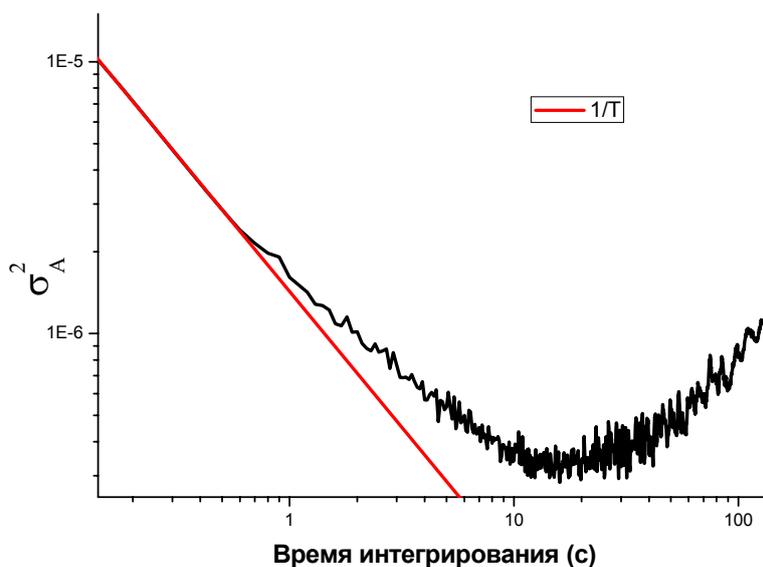


Рис. 3.11. Зависимость зависимости вариации Аллана от времени интегрирования. Оптимум – 13.6 с.

3.3. Влияние температуры микросхемы на основные характеристики приемника.

Характеристика прибора зависят также от внешних условий, например, температуры. Интересным с точки зрения стабильности системы и ее зависимости от внешних факторов, является исследование изменения ее характеристик при повышении температуры микросхемы приемника.

Во время последней тестовой кампании по исследованию спектров газа OCS, проведенной в DLR в декабре 2011 года было отмечено увеличение

физической температуры микросхемы приемника по сравнению с 2009-2010 годами. Такие выводы были сделаны на основании анализа тока утечки РДП, – по его увеличению можно произвести качественную оценку изменения температуры (см. рис. 3.14).

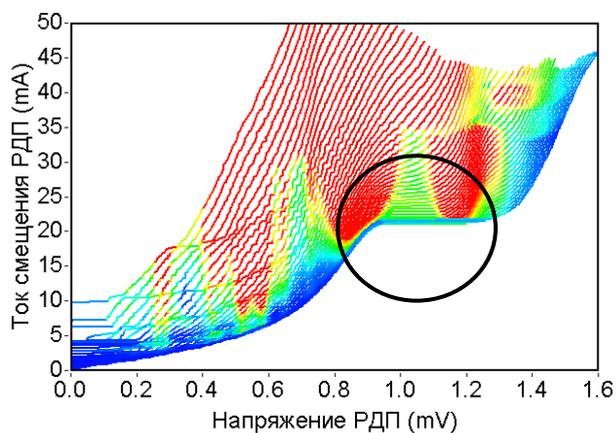


Рис. 3.12. ВАХ РДП, 29.03.2011

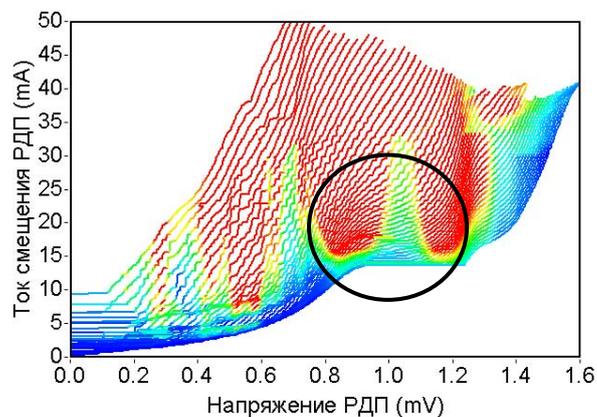


Рис. 3.13. ВАХ РДП, 09.12.2008

На рис. 3.12 и 3.13 представлены ВАХ РДП, измеренные в 2011 и 2008 годах соответственно. В 2011 году температура микросхемы увеличилась. Выделены области, в которых наиболее заметно изменение формы ВАХ.

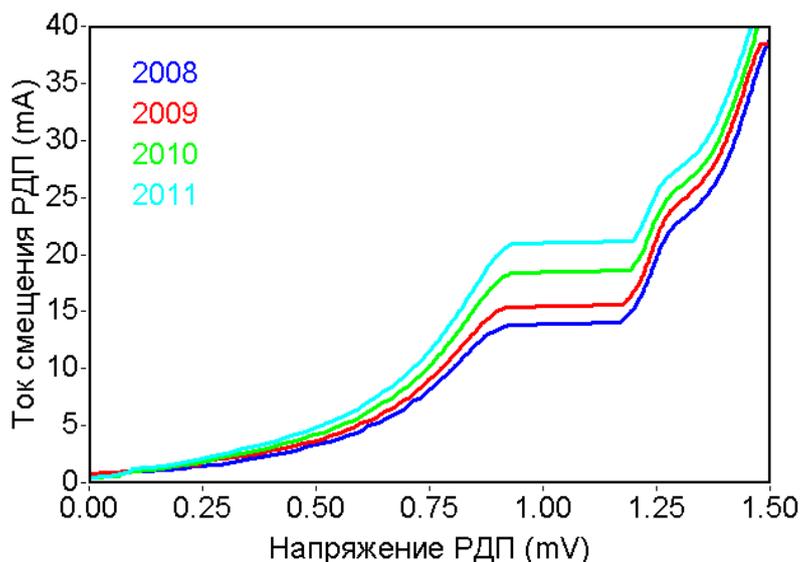


Рис. 3.14. Зависимость ВАХ РДП при токе контрольной линии 70mA от даты измерения.

Год измерения и ток утечки на 1 мВ отмечены на графике

На рис. 3.14 представлены ВАХ РДП, из которых видно, что ток утечки при 1 мВ вырос с 14 мА в 2008 году до 21 мА в 2011. Также видно, что рабочий диапазон РДП (особенно в области ступеней Фиске) уменьшился с 15-35 мА до 25-35 мА. К примеру, если в 2008 году в рабочей области были доступны 3-4 ступени Фиске для заданной частоты, то в 2011 году для некоторых частот не так просто было найти даже одну ступень Фиске. Изменение температуры и ухудшение теплоотвода от микросхемы также повлияли и на процедуру управления СИП – время установления теплового равновесия после изменения рабочей точки увеличилось вдвое, что привело к увеличению времени, необходимого для перестройки частоты до 3 минут.

Увеличение температуры микросхемы повлияло также и на спектральные характеристики СИП. Максимальное изменение спектральных характеристик приемника было отмечено для максимальной частоты РДП (см. рис. 3.15). Ширина автономной линии генерации РДП на частоте 619.1 ГГц увеличилась с 11 до 17 МГц, что сильно ухудшило спектральное качество линии. В Таблице 3.1 представлены изменения спектральных характеристик РДП при увеличении температуры микросхемы.

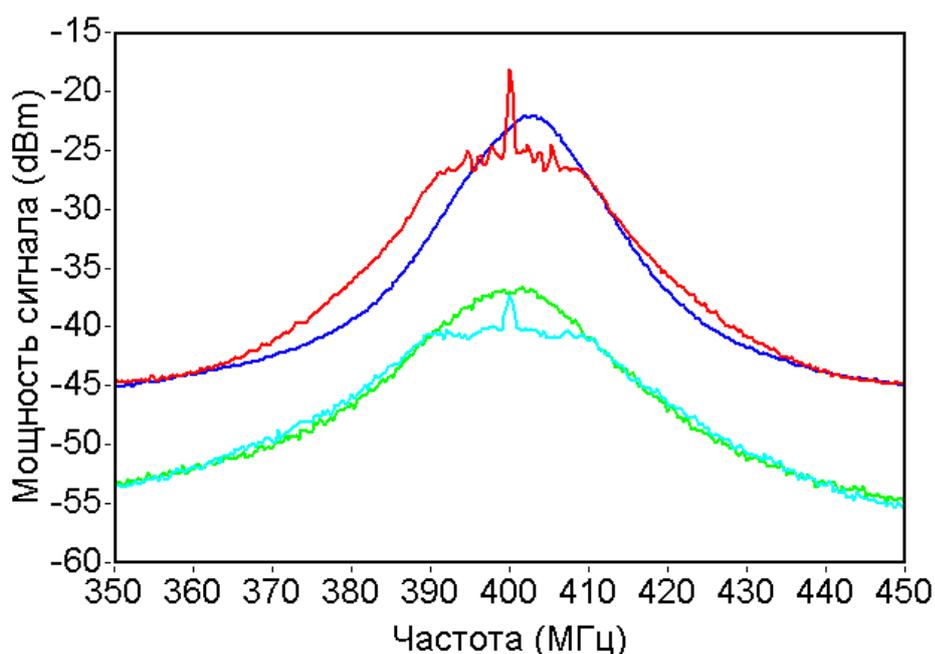


Рис. 3.15. Преобразованный вниз спектр РДП на частоте 619.1 ГГц.

Таблица 3.1. Ухудшение спектральных характеристик РДП при увеличении температуры.

Частота, ГГц	507.3	515.25	619.1
Спектральное качество, %, 2009	60	57	28
Автономная ширина линии, МГц, 2009	4.3	7	10.7
Спектральное качество, %, 2011	38	44	16
Автономная ширина линии, МГц, 2011	11	8	17

Эффект постепенного увеличения температуры приемника оказал влияние также и на характеристики чувствительности СИП. Минимальная шумовая температура приемника увеличилась, фактически, во всем рабочем диапазоне частот.

Таблица 3.2. Зависимость шумовой температуры СИП от частоты и года измерения.

Частота, ГГц	495.2	496.88	505.34	507.52	515.25	519.58	546.76	619.1
Шумовая температура, К, 2009	232	254	246	244	247	256	467	338
Шумовая температура, К, 2011	254	266	260	275	257	296	487	338

Возможные причины ухудшения теплового режима прибора могут быть найдены на основании исследования динамики изменения температуры при резком изменении тока через образец. Рассмотрим две возможные причины такого ухудшения. Первая – микросхема СИП отклеилась от линзы, как это уже случилось в 2007 году. В таком случае тепловое равновесие при резком изменении тока достигалось бы достаточно медленно – дополнительно тепло отводилось бы только через сверхпроводящие бонды. Но, как показывают последние измерения, тепловое равновесие при изменении тока контрольной линии РДП на 40 мА достигается всего через 60

секунд. Также, в этом случае деградация параметров приемника происходила бы гораздо быстрее, чем представлено на рис. 3.14. Вторая возможная причина ухудшения теплового режима – плохой тепловой контакт между холодным дном криостата и хладопроводами, идущими к держателю микросхемы. Еще при сборке полетного криостата в 2007 году отмечали ненадежность конструкции этого узла – после большого количества термоциклов и жестких приземлений инструмента TELIS винты, крепящие хладопроводы, могли ослабнуть. Отметим, что инспекция крепления хладопроводов потребовала бы полной разборки криостата и последующей оптической юстировки. Однако, даже в условиях повышенной температуры СИП удалось полностью выполнить полетную программу в марте 2011 года.

3.4. Выводы главы.

Исследование свойств СИП, проведенное в этой главе, позволяет сделать следующие выводы:

- 1) Автономная ширина линии излучения РДП в пределах одной ступени Фиске изменяется в несколько раз (от 22 до 5 МГц для рассмотренной конфигурации) и имеет минимум в геометрическом центре ступени.
- 2) Точность измерения напряжения РДП критична для работоспособности прибора, и должна быть лучше 1 мкВ
- 3) Шумовая температура СИП зависит от частоты гетеродина, рабочей точки РДП, рабочей точки СИС и гармонического смесителя, качества подавления критического тока СИС смесителя. При настройке СИП для приема сигнала на заданной частоте оптимизация шумовой температуры должна производиться по всем вышеперечисленным параметрам.
- 4) Стабильность работы приемника высока и достаточна для проведения измерений в составе инструмента TELIS. В лабораторной конфигурации оптимальное время интегрирования сигнала для полосы 183 КГц составляет 13.6 с.

- 5) Температура микросхемы СИП сильно влияет на спектральные характеристики и шумовую температуру прибора.

Результаты исследований, описанных в этой главе, позволили создать алгоритмы и методики оптимизации параметров всех составных частей СИП для достижения спектрометром требуемых характеристик. Многопараметрическая задача оптимизации была формализована и представлена в виде алгоритма с ясными целями и способами ее достижения. Подробное исследование спектральных характеристик СИП привели к созданию автономной процедуры непрерывной перестройки частоты генерации РДП, в том числе в области ступеней Фиске, что ранее считалось фактически невыполнимой задачей. Стабильность прибора, исследованная по методу вариации Аллана, сравнима со стабильностью стационарных спектрометров для астрономических исследований.

4. СИП в качестве приемного элемента инструмента TELIS

Сверхпроводниковый интегральный приемник был впервые использован в качестве приемного элемента практического устройства при создании инструмента TELIS (см. главу 1). Хотя идея интеграции всех элементов супергетеродинного приемника на один чип была предложена раньше, именно проект TELIS позволил воплотить идею в жизни, создать конечный прибор для научных исследований. Успешные запуски инструмента, полученные научные данные, явились доказательством работоспособности интегрального приемника, подтвердили его уникальные характеристики. В данной главе будет представлен подробный обзор инструмента в целом, описаны и представлены результаты нескольких тестовых кампаний инструмента, а также основной результат данной работы – алгоритмы полетного управления СИП и некоторые научные результаты успешных запусков инструмента TELIS в 2009 – 2011 годах.

4.1. Инструмент TELIS.

Инструмент TELIS является совместной разработкой Центра аэрокосмических исследований Германии (DLR), Института космических исследований Нидерландов (SRON) и ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, а также Лаборатории Резерфорда - Эпплтона (RAL), Великобритания. Координатором проекта является DLR; в DLR был разработан также один из трех приемников – супергетеродинный приемник со смесителем на горячих электронах (Hot Electron Bolometer - НЕВ) на 1.8 ТГц. Два других приемника используют СИС переходы в качестве чувствительных элементов – 500 ГГц приемник разработки RAL и СИП для частот 490-650 ГГц совместной разработки SRON и ИРЭ РАН.

Большая часть компонентов инструмента – криостат, телескоп, вся оптика, управляющая электроника были созданы специально для данного проекта.

На рис. 4.1 представлена схема инструмента TELIS. Принимаемый сигнал фокусируется подвижным телескопом и посредством неохлаждаемого квазиоптического тракта разделяется на три части, а затем передается на приемные элементы. Для калибровки с помощью подвижного зеркала производится переключение входа на абсолютно черное тело заданной температуры. В качестве оконечного спектрометра сигнала промежуточной частоты используется цифровой автокоррелятор с разрешением 2 МГц и шириной полосы 4 ГГц. Для централизованного управления инструментом и системой связи используется встроенный компьютер типа PC-104. Информация о местоположении, высоте и направлении, в котором развернут инструмент, поступает от системы телеметрии инструмента MIPAS. Все данные, получаемые во время полета, передаются по радиоканалу в наземную часть системы управления, а также сохраняются на носителе информации на борту, на случай проблем со связью.

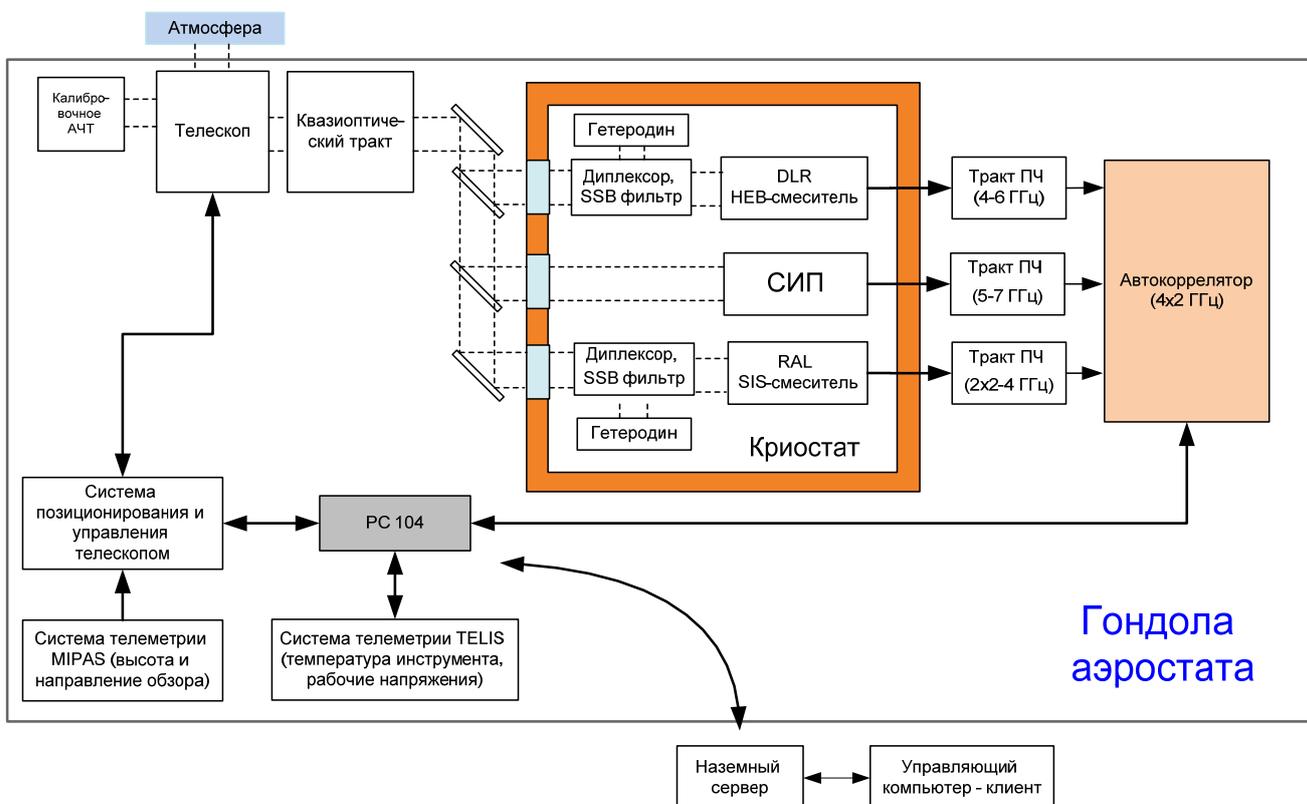


Рис. 4.1. Блок-схема инструмента TELIS.

Приемник на частоту 500 ГГц был разработан RAL и представляет собой супергетеродинный приемник с волноводным СИС смесителем в качестве чувствительного элемента, работающий в однополосном режиме при фиксированной частоте гетеродина и широкой полосе ПЧ. Основная задача – измерение концентрации ClO, BrO, N₂O и O₃ в стратосфере в частотном диапазоне 497 – 504 ГГц. Сигнал гетеродина частотой 484 ГГц получается путем умножения сигнала твердотельного генератора частотой 32.3 ГГц, расположенного снаружи криостата, каскадом умножителей x2 и x5, смонтированных на азотном экране криостата. Частотный диапазон сигнала промежуточной частоты – 14-18 ГГц. Ожидаемая шумовая температура в однополосном режиме – 600 К. К сожалению, данный приемник на этапе предварительного тестирования не заработал должным образом (не удалось достичь шумовой температуры менее 6 000 К), и поэтому при проведении полетных измерений не использовался. Его частотный диапазон был перекрыт СИП, продемонстрировавшим шумовую температуру (в двухполосном режиме) менее 250 К в диапазоне 497-504 ГГц.

СИП – супергетеродинный приемник для приема излучения с частотой от 488 до 626 ГГц, который является основным объектом исследования данной работы, и о котором подробно было рассказано в первой главе, работает в двухполосном режиме. На холодной пластине установлен держатель образца вместе с платой задания токов смещения (рис. 1.11), магнитный экран, низкошумящие охлаждаемые НЕМТ усилители ПЧ (полоса 4-8 ГГц) с циркуляторами, фильтры токов смещения и оптические элементы. На рис. 4.2 представлена трехмерная модель охлаждаемого дна криостата с установленными элементами канала СИП. Первоначально планировалось использовать СИП в однополосном режиме, поэтому на модели в квазиоптическом тракте присутствует интерферометр Мартина-Паплетта, действующий как широкополосный перестраиваемый фильтр высокой частоты. Позднее, перед первым полетом инструмента, было решено работать в двухполосном режиме приема, для чего интерферометр Мартина-

Паплетта был заменен зеркалом. Система ФАПЧ, платы питания охлаждаемых усилителей ПЧ и неохлаждаемые усилители ПЧ системы ФАПЧ установлены на внешней оболочке криостата. Неохлаждаемые усилители ПЧ сигнала СИС смесителя установлены отдельно на плате автокоррелятора. Система задания токов смещения, питания компонентов системы и опорный синтезатор гармонического смесителя располагаются в отдельном блоке – TSCU (Telis Source Control Unit), закрепленном на раме инструмента TELIS. Более подробно об этом блоке будет рассказано в следующей части данной главы.

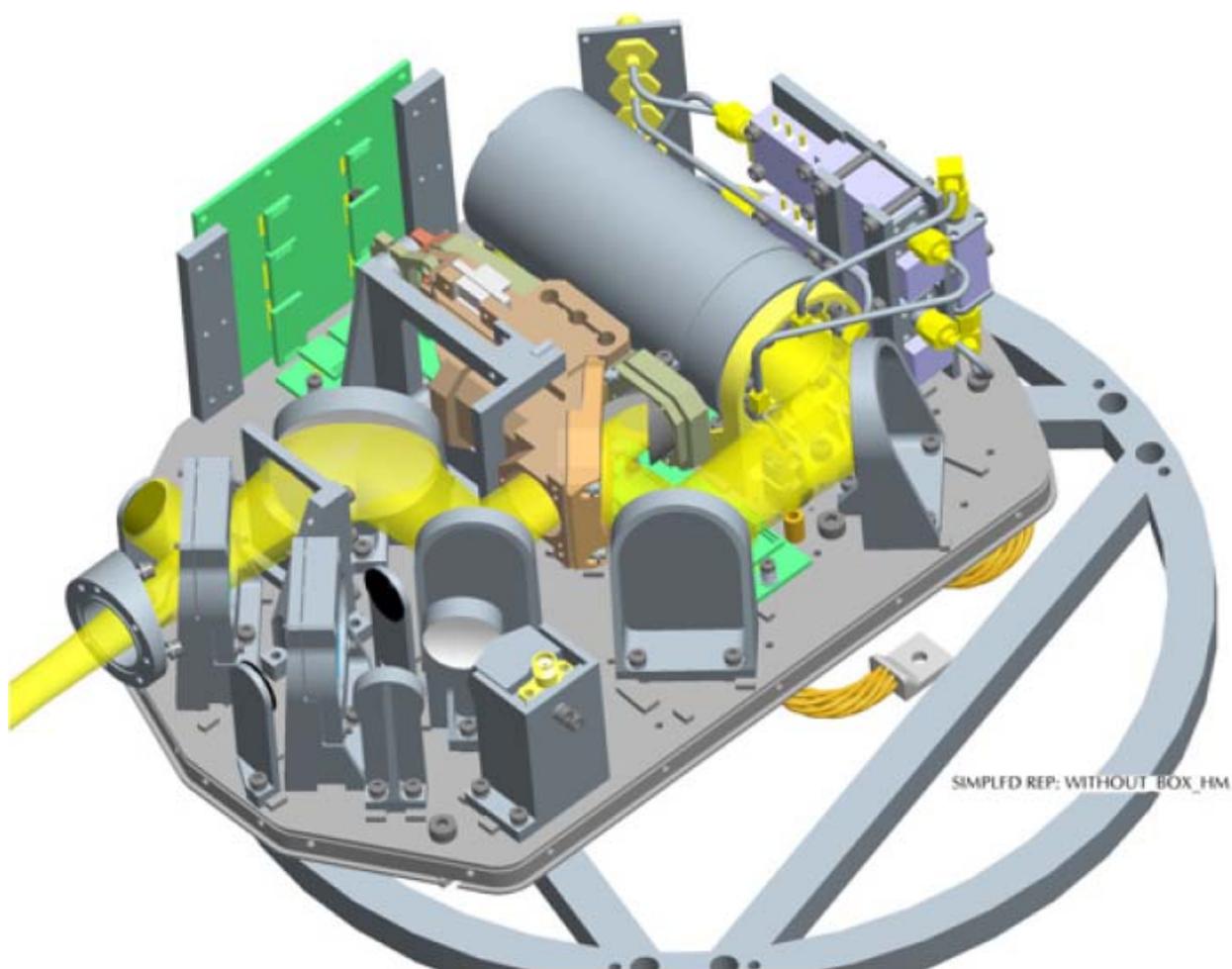


Рис. 4.2. Трехмерная модель охлаждаемой части канала СИП [47].

Приемник на 1.8 ТГц, разработанный в DLR, представляет собой супергетеродинный спектрометр, работающий в двухполосном режиме. Смесительный элемент – болометр на горячих электронах (НЕВ) созданный на базе пленки NbN, изготовленной в Московском Педагогическом Государственном Университете. Частотный диапазон приемника 1 780 – 1 880 ГГц. Гетеродин - внешний генератор 16.5 – 17.5 ГГц, сигнал которого умножается последовательно на нескольких умножителях 2х и 3х, основанных на диодах Шоттки, которые расположены на азотном экране криостата. Основная задача этого спектрометра – исследование концентрации ОН, второстепенная – измерение содержания в атмосфере NO₂, HCl, NO, NO₂, O₃, H₂O+изотопы, O₂ и HOCl.

Конструктивно криостат инструмента TELIS – заливной гелиевый с азотной рубашкой (рис. 4.3). Гелиевый и азотный объемы крепятся к внешнему корпусу кевларовыми растяжками. Такая система позволяет сохранить юстировку внутренней оптики относительно внешней при охлаждении криостата до рабочей температуры. Внутри криостата, разработанного в RAL Марком Харманном, располагаются две охлаждаемые оптические платформы для установки приборов. На одной из них, расположенной сверху криостата, установлен приемник на 1.8 ТГц, а на второй (нижней) – СИС приемник на частоту 500 ГГц и СИП. Вес криостата не превышает 20 кг. Внешние генераторы гетеродина для НЕВ и СИС приемников также закреплены на криостате. Объем заливаемого гелия – 15 литров, такого количества хватает для работы в течение 24 часов.

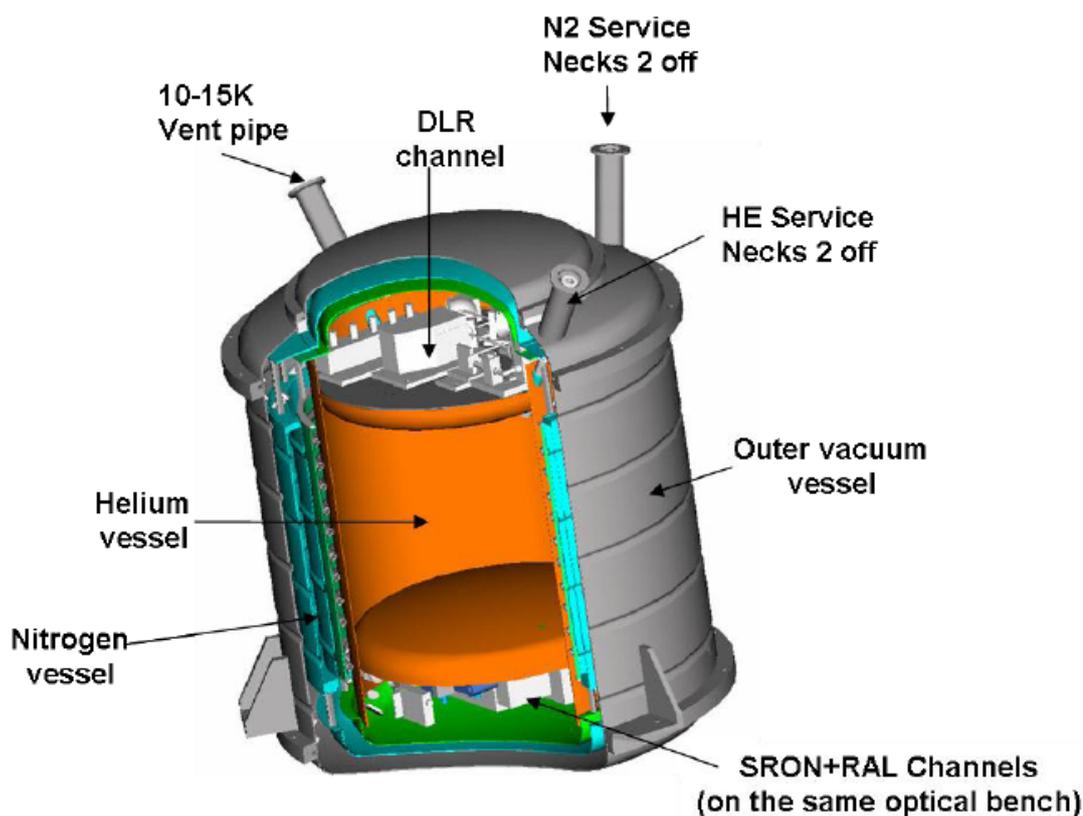


Рис. 4.3. Криостат инструмента TELIS, отмечены основные элементы и расположение всех трех приемников [Harman, 2002]

Инструмент TELIS предназначен для установки в гондоле высотного аэростата совместно со спектрометром MIPAS-B (разработка Института метеорологических исследований Карлсруэ, Германия) и инструментом mini-DOAS (Университет Бремена и Хайдельберга, Германия). Эти три инструмента, предназначенные для дистанционного исследования излучения атмосферы, ее состава, а также состояния высотных облаков, вместе покрывают большой диапазон исследуемых частот, что позволяет проводить перекрестную проверку результатов измерения – спектральные линии одного и того же вещества, измеренные разными инструментами, должны давать схожую информацию о концентрации вещества. На рис. 4.4. представлены фотографии гондолы высотного аэростата с установленными инструментами и фотография инструмента TELIS без теплоизоляции.

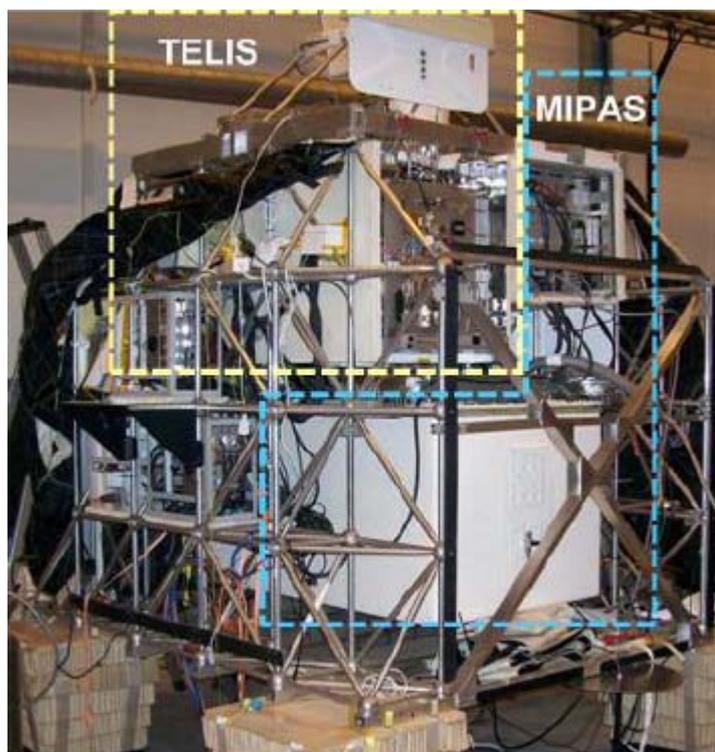


Рис. 4.4. Фотография двух инструментов – TELIS и MIPAS-B, установленных в гондоле аэростата во время полетной кампании 2009 года [35].

MIPAS – B – инфракрасный Фурье-спектрометр, созданный специально для установки на высотный аэростат, позволяет производить наклонное сканирование атмосферы с разрешением по высоте 2-3 км. Диапазон длин волн – от 4 до 13.3 μm , частотное разрешение – 0.0345 cm^{-1} . Инструмент предназначен для измерения зависимости от высоты концентрации озона, и прочих веществ, связанных с разрушением озонового слоя планеты (NO , NO_2 , HNO_3 , N_2O_5 , ClONO_2 , HO_2NO_2 , CH_4 , N_2O +изотопы, CFC-11, CFC-12, CCl_4 , C_2H_6 , SF_6).

Mini-DOAS – двухканальный спектрометр, предназначенный для наклонного сканирования атмосферы в диапазоне длин волн от 320 до 530 нм с разрешением от 0.4 до 0.7 нм. Инструмент позволяет измерять зависимость от времени поглощения инфракрасного и видимого излучения атмосферными радикалами, такими как озон, NO_2 , CH_2 , $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_2$, HNO_2 , BrO , IO [48].

4.2. Система управления СИП в составе инструмента TELIS.

В процессе автоматизации процесса разработки и применения СИП можно выделить два основных этапа: исследование характеристик приемника с целью поиска оптимальной рабочей точки, описанное в главе 3 и непосредственно управление приемником. Исследование характеристик проводится для каждого отдельно взятого образца. Однако, это не гарантирует полное сохранение параметров при следующем использовании этого образца. Причиной тому могут быть и захват магнитного вихря в сверхпроводящих электродах микросхемы в непосредственной близости от РДП, что эквивалентно изменению режима осциллятора по магнитному полю, и небольшое изменение температуры, и небольшие вариации мощности опорного синтезатора, и множество других причин. Следствием является то, что при каждом следующем охлаждении образца до рабочей температуры недостаточно выставить все параметры системы в какое-то ранее записанное оптимизированное состояние. Необходимо проводить дополнительную проверку и оптимизацию некоторых параметров, а в процессе работы постоянно контролировать приемник и, при необходимости, подстраивать оптимальные режимы его работы.

Итак, система управления СИП должна решать следующие задачи:

- Выставление ранее оптимизированных параметров СИП.
- Контроль рабочих параметров СИП.
- Поддержание рабочего состояния.

Выставление параметров СИП происходит в два этапа – непосредственно выставление значений источников, затем тонкая подстройка системы с целью фазовой синхронизации РДП и оптимизация параметров системы ФАПЧ. Тонкая подстройка РДП на ступенях Фиске усложняется тем, что необходимо устанавливать рабочую точку непосредственно в центр ступени, учитывая гистерезис (см. пункт 3.1).

При разработке системы управления следует учитывать ограничения, накладываемые экспериментальной установкой и условиями проведения

измерений – ограниченность пропускной способности радиоканала между землей и аэростатом, требования максимального быстродействия и надежности автономных алгоритмов.

Процедура выставления частоты генерации РДП является, пожалуй, самой сложной задачей автоматизации СИП, даже в том случае, когда оптимальные параметры РДП уже определены в предыдущих исследованиях (см. п. 3.1).

По причинам, описанным ранее, для точного задания частоты РДП недостаточно просто выставить ранее записанные значения токов, поэтому была разработана специальная процедура выставления параметров РДП. Основная идея алгоритма – задание частоты РДП (близкой к заданной) по ранее записанным данным, и постепенная подстройка для достижения точно заданной частоты с учетом особенностей настройки РДП и системы ФАПЧ. После включения системы ФАПЧ подстройка осуществляется путем минимизации сигнала фазовой ошибки. При подстройке в области вязкого течения джозефсоновских вихрей (частота РДП выше примерно 600 ГГц для образцов на базе переходов Nb/AlN/NbN) используется непрерывность величины R_dCL (см. пункт 3.1) и управление частотой генерации РДП происходит путем плавного изменения тока контрольной линии РДП.

Дополнительные трудности возникают при управлении РДП в области ступеней Фиске. В случае лабораторных исследований мы можем контролировать частоту РДП, используя сигнал ПЧ ФАПЧ, вручную управляя током контрольной линии или током смещения РДП. Но даже в таких условиях резонансная структура ступеней Фиске требует очень аккуратного управления – причиной тому «скачки» на ВАХ (см. рис. 3.5), а также гистерезис, возникающий при движении по ВАХ. В условиях реальных полетных измерений приходится работать «вслепую» - в конструкции полетной системы управления не предусмотрен анализатор спектра, позволяющий определять частоту джозефсоновской генерации РДП с точностью лучше 100 МГц. Кроме того, из-за ограниченной пропускной

способности радиоканала отсутствует возможность детально исследовать ВАХ РДП, как это сделано, к примеру, на рис. 3.3 и 3.4 (это займет несколько десятков минут, что недопустимо по условиям полета) и затем выставить определенное значение токов управления РДП. Для решения этих задач был разработан описанный в пункте 3.1 комплексный алгоритм выставления частоты РДП.

Система ФАПЧ способна удерживать сигнал, попавший в полосу захвата. В определенных пределах она достаточно надежно удерживает линию излучения, возмущаемую небольшими по величине и продолжительности помехами (шумы аппаратуры и внешние помехи). Однако относительно медленные и сильные по амплитуде уходы частоты (к примеру, тепловые дрейфы), система ФАПЧ скомпенсировать не может, и требуется постоянная корректировка посредством подстройки частоты РДП. В системе ФАПЧ, используемой в нашем случае имеется выход, с которого снимается сигнал, пропорциональный фазовому рассогласованию между частотой РДП и опорным синтезатором (PLL Phase Level, сокращенно PLL PL). Таким образом, анализируя этот сигнал ошибки, можно определить ухудшение синхронизации, которое приведет в дальнейшем к потере стабильности. Как уже было отмечено ранее, частоту РДП можно подстраивать посредством изменения тока контрольной линии РДП (FFO CL).

Для работы системы поддержания необходим захват частоты системой ФАПЧ. Перед включением системы поддержания производится экспериментальное определение коэффициента $R = \frac{d(PLL PL)}{dI_{CL}}$ (снимаются 2 значения PLL PL при небольших отклонениях по FFO CL), а затем с его использованием рассчитывается величина, на которую должен измениться ток FFO CL для минимизации сигнала ошибки PLL PL. Таким образом, при активном режиме поддержания, система стабилизируется за один, максимум

два шага. Система была многократно проверена в различных условиях (нагрев, действие магнитных полей и пр.) и доказала свою эффективность

В институте космических исследований Нидерландов была разработана аппаратная система управления СИП, один из вариантов которой (с некоторыми упрощениями) использовался для лабораторного исследования СИП (см. п. 2.1). Полетная система управления является полностью автономной, управляемой по радиоканалу (см. рис. 4.5). В полетном варианте, по понятным причинам, отсутствует анализатор спектра, что приводит к невозможности наблюдать за спектром излучения РДП в реальном времени. Также, пропускная способность радиоканала ограничена, а неизбежные для такого типа связи задержки замедляют процесс управления. Все вышеперечисленные особенности полетного варианта системы заставили отказаться от традиционной системы управления СИП, предусматривающей сначала задание, затем контроль установленных параметров и, при необходимости, коррекцию оператором. Были разработаны автономные алгоритмы управления СИП.

В блок TSCU были интегрированы микроконтроллеры, позволяющие выполнять заранее запрограммированные последовательности действий (сценарии), по команде с земли. Таким образом, к примеру, для измерения ВАХ СИС перехода достаточно послать команду запуска сценария, и затем, после измерения, получить массив данных, вместо выполнения процедуры задания напряжения и измерения тока для каждой точки ВАХ. Интеграция таких сценариев резко повысила скорость системы управления приемником и уменьшила нагрузку на радиоканал. В результате совместной работы со специалистами института космических исследований Нидерландов основные алгоритмы управления (установка частоты РДП, настройка системы ФАПЧ) были реализованы в микроконтроллерах TSCU.



Рис 4.5. Блок-схема полетной измерительной установки.

Блок TSCU потребовал создания специальной программной системы управления СИП, которая была разработана в SRON. Система по архитектуре сильно отличается от используемой для исследования характеристик СИП программы IRTECON. Основная часть - ядро программы, устанавливается на специальном сервере, размещенном в наземном центре управления и доступном по сети Ethernet. По этой же сети сервер подключается к ПО, управляющему инструментом (разработки DLR), которое уже транслирует команды по радиоканалу на аэростат. На аэростате команды обрабатываются встроенным компьютером на основе PC104 и передаются в управляющую электронику - TSCU. На сервере создается веб-интерфейс (рис. 4.6) для управления прибором и контроля его параметров. Доступ к этому веб-интерфейсу осуществляется с любого клиентского компьютера, находящегося в одной сети с сервером. Таким образом, для управления СИП не требуется устанавливать никакого программного обеспечения – достаточно браузера. Такая система обладает целым рядом преимуществ: отсутствием привязки к операционной системе и аппаратной конфигурации

управляющего компьютера. Однако, такая система работает медленнее, чем лабораторные аналоги, обладает ощутимым «мертвым временем», в течение которого информация не поступает, зависит от задержек каждого сегмента сети передачи данных. Для контроля состояния прибора каждые 2 секунды TSCU передает данные телеметрии, включающие в себя кроме данных о напряжениях и токах смещения элементов приемника также информацию о температуре электроники, токах и напряжениях усилителей, заряде батарей и прочую информацию, необходимую для контроля состояния прибора. Простейшие действия, например, измерения ВАХ элементов СИП, а также процедуры оптимизации рабочей точки имплементированы в виде исполняемых сценариев в TSCU. Веб-интерфейс также обладает рядом недостатков – невозможно измерение зависимостей, не сконфигурированных заранее, отсутствуют возможности анализа данных. Однако, для управления штатно работающим СИП его возможностей достаточно, что было продемонстрировано во время многочисленных тестовых и полетных кампаний инструмента TELIS. ПО ведет запись всех параметров системы, и по окончании измерений возможно провести анализ работы прибора. К примеру, так – ретроспективно - были обнаружены осцилляции тока питания усилителей ПЧ, возникающие по непонятной пока что причине при охлаждении инструмента до температуры 0°C.

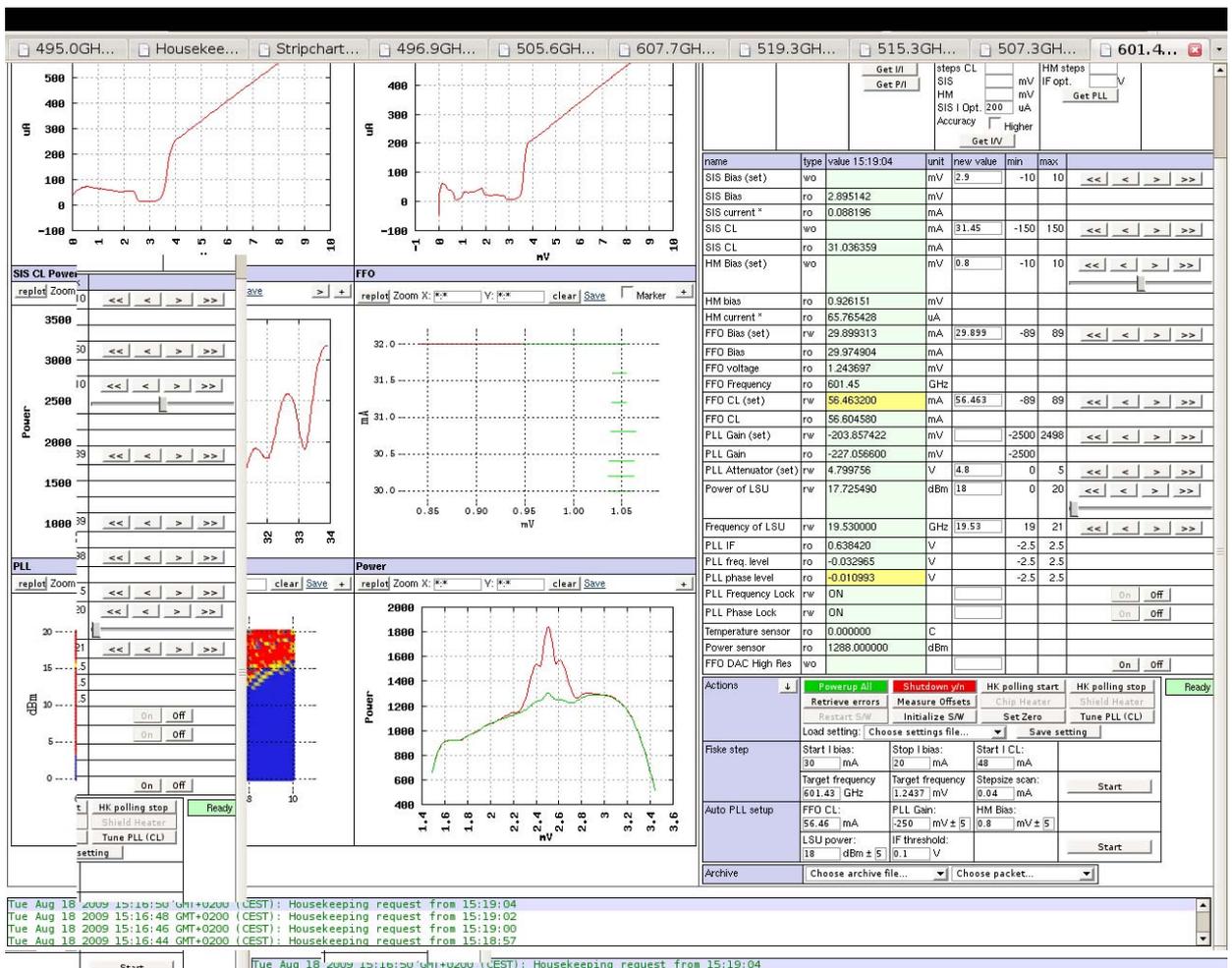


Рис. 4.6. Веб-интерфейс полетной программы управления СИП. Слева – основные вольт-амперные характеристики, справа – рабочие параметры приемника, справа внизу – параметры процедур оптимизации рабочей точки.

4.3. Тестовые кампании инструмента TELIS.

Инструмент TELIS, как и любой сложный прибор, нуждается в калибровке и характеристике. В период 2008 – 2011 гг. было проведено несколько тестовых кампаний с участием автора, направленных на изучение характеристик инструмента, критичных для обработки полученных спектров, к примеру, особое внимание было уделено измерению отношения полос приема для двухполосных приемников.

5 июня 2008 года на полигоне Терезина в Бразилии был произведен первый запуск инструмента MIPAS/TELIS/miniDOAS. Полет продолжался более 19 часов. Во время подъема аэростата при прохождении тропопаузы температура воздуха вокруг инструмента опустилась до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, что оказалось намного ниже ожидаемой температуры. Это привело сразу к нескольким проблемам. Во-первых, замерзли кабели, соединяющие подвижную часть телескопа с неподвижной, что привело к невозможности сканирования по высоте. Во-вторых, замерзли вакуумные уплотнения криостата, выполненные из Витона, в результате чего вакуумная часть криостата потеряла герметичность, что привело к ухудшению теплоизоляции гелиевого объема, и большому расходу гелия. В результате гелий, залитый из расчета на 24-часовой полет, испарился за 3 часа. В конечном итоге, измерения провести не удалось.

По итогам полета криостат и телескоп были модифицированы, подверглась переработке вся концепция теплоизоляции инструмента – стало понятно, что инструмент необходимо утеплять и не допускать его охлаждения до критических температур. Осенью 2008 года для проверки сделанных изменений перед следующим полетом был проведен термовакуумный тест. Модифицированный инструмент помещался в специальную вакуумную камеру, снабженную откачным стендом и системой охлаждения (рис. 4.7). Основная цель эксперимента – смоделировать условия, в которых находится инструмент во время полета – низкое давление и температура.



Рис. 4.7. Установка для проведения термовакuumного теста.

В процессе проведения теста температура опускалась до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Была обнаружена еще одна вакуумная течь, что привело к тем же последствиям, что и во время полета в Терезине. Телескоп и управляющая электроника работали штатно, переохлаждения инструмента не произошло. Во время проведения эксперимента СИП был установлен в рабочую точку. Далее криостат был исследован на наличие вакуумной течи гелиевым течеискателем, была обнаружена трещина в вакуумном разьеме. После ремонта инструмент был подготовлен к полету зимой 2009 года.

Во время каждой полетной и тестовой кампании производится калибровка телескопа – измерение его диаграммы направленности. Для проведения этого исследования в DLR была разработана специальная тестовая установка, рабочая область которой представляет собой зеркальное отображение телескопа, установленное на неподвижной платформе (позиция 2 на рис. 4.8). В фокусе этого зеркала располагается источник света – ртутная лампа и диафрагма. Излучение ртутной лампы принимается спектрометром, в тракте ПЧ которого установлен измеритель мощности. При сканировании в момент совпадения оптических осей телескопа и неподвижного зеркала мощность максимальна. На рис. 4.9. представлены результаты измерения диаграммы направленности канала СИП для разных частот гетеродина. Как можно заметить, диаграмма направленности зависит от частоты гетеродина, но не зависит от направления сканирования, что демонстрирует хорошую механическую стабильность системы сканирования.

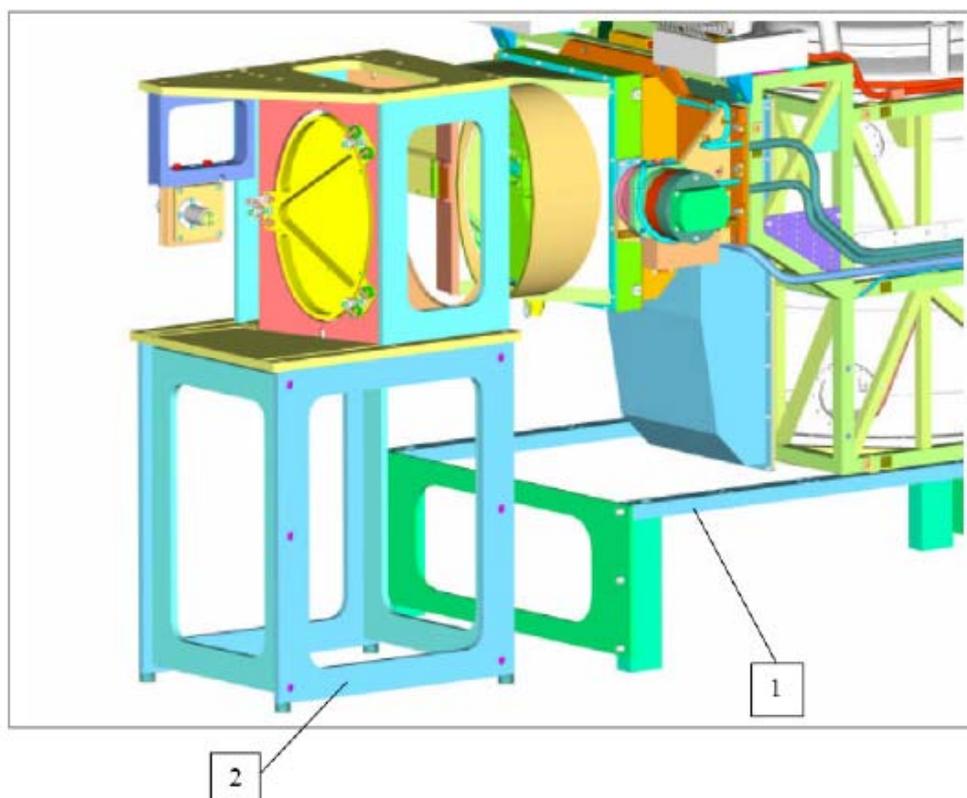


Рис. 4.8. Трехмерная модель установки для измерения диаграммы направленности телескопа. 1 – инструмент TELIS, 2 – тестовая установка с источником света [М. Birk, 2009].

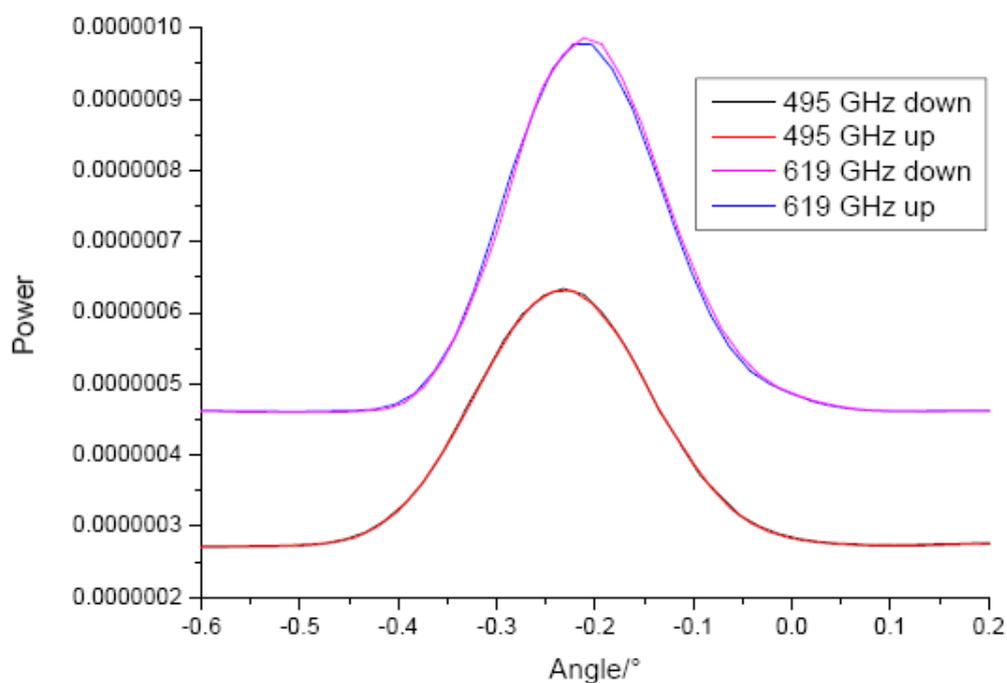


Рис. 4.9. Диаграмма направленности канала СИП для двух значений частоты гетеродина и направлений сканирования. По оси абсцисс отложен угол поворота телескопа [М. Birk, 2009].

Важную роль в характеристике инструмента играет измерение отношения коэффициентов преобразования верхней и нижней полос приема. Это соотношение используется для калибровки измеренных данных и имеет определяющее значение для обработки спектров, полученных во время полета. Первый такой эксперимент был проведен с использованием лабораторного инструмента – инфракрасного Фурье-спектрометра Bruker IFS 120 HR (рис. 4.10).

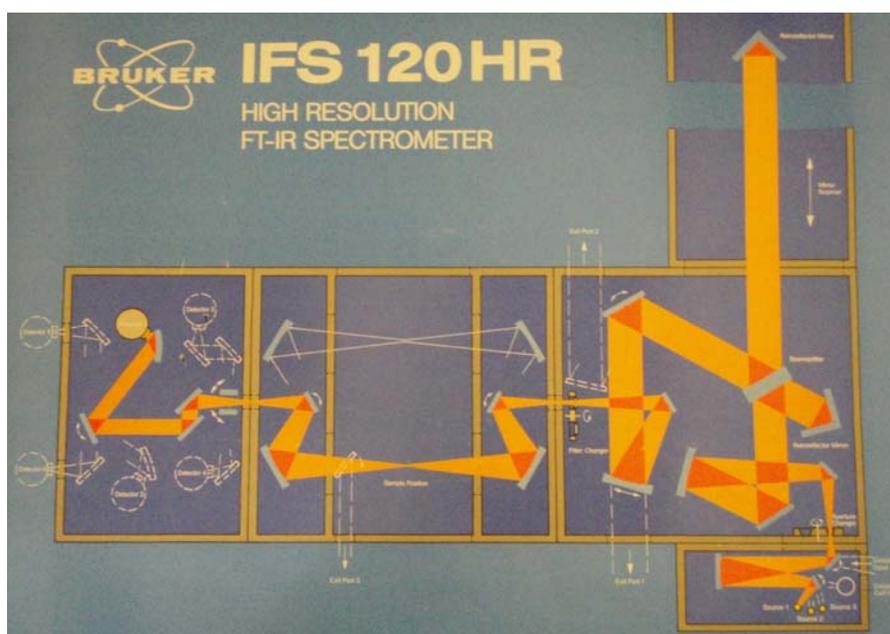


Рис. 4.10. Схема ИК Фурье-спектрометра Bruker IFS 120 HR.

Изменение длины подвижного плеча этого интерферометра достигает 7.1 метра, что определяет максимальное разрешение этого спектрометра, равное 30 МГц. В качестве источника сигнала использовались ртутная лампа и Глобар (источник инфракрасного излучения, представляющий собой стержень из карбида кремния, нагреваемый пропускаемым через него электрическим током до температуры порядка 1200—1400 °С). В ходе эксперимента измерялся отклик прибора для разных частот гетеродина СИП. Такой способ исследования позволяет измерить отклик прибора независимо для нижней и верхней полос приема в условиях, максимально приближенных к реальным измерениям атмосферы. Результаты исследования представлены на рис. 4.11. По оси абсцисс отложена частота излучения в обратных сантиметрах. В переводе на более привычные единицы измерения частоты изображенный диапазон соответствует частотам от 500 до 527 ГГц. При проведении измерений была обнаружена нестабильность получаемых данных, которая вызвана возникновением стоячих волн между окном криостата и входным вакуумным окном спектрометра Bruker. Любые вибрации и перемещения криостата приводили к искажению результатов измерения. В конечном итоге было признано, что данные этой тестовой

кампании не могут быть напрямую использованы при обработке данных полетных исследований. Основной результат кампании – подтверждение предположения о зависимости соотношения полос приема как от частоты гетеродина СИП, так и от свойств квазиоптического тракта системы измерений.

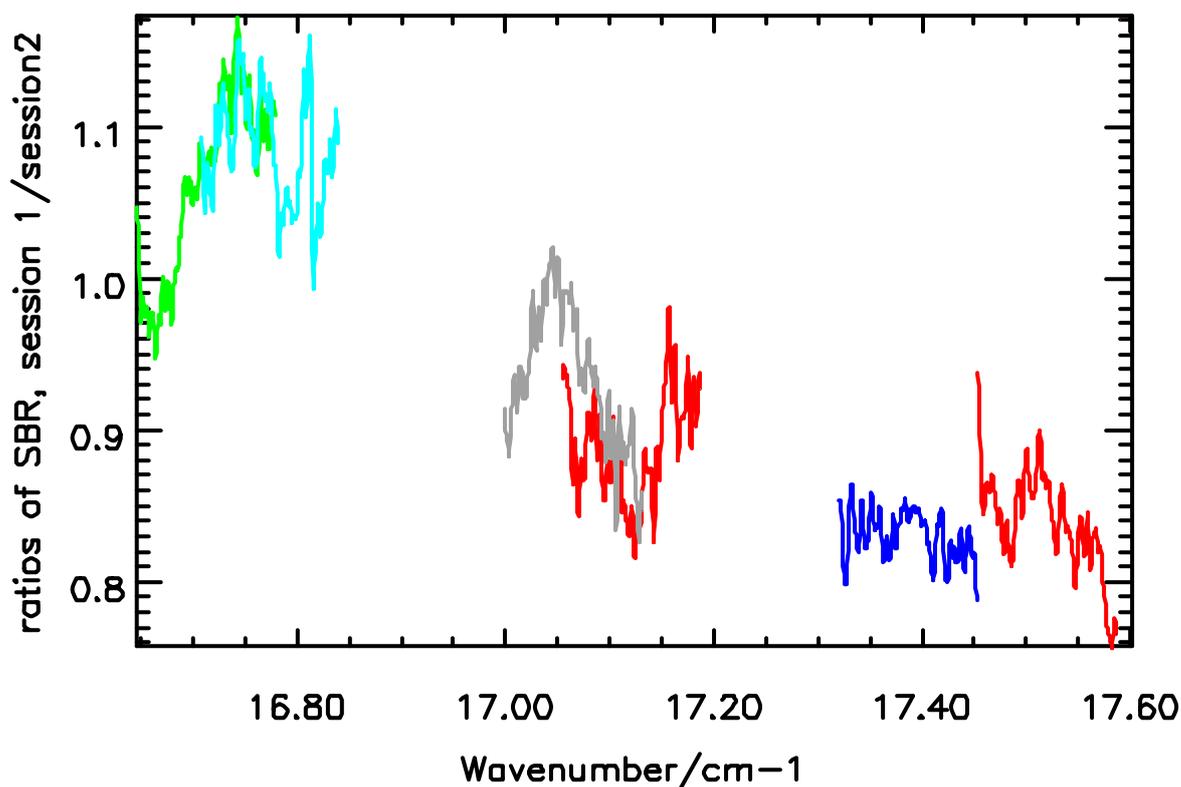


Рис. 4.11. Соотношение полос приема СИП для частот гетеродина от 500 до 527 ГГц [М. Birk, 2009].

С точки зрения интегрального теста инструмента, проверки его работоспособности и соответствия его характеристик заявленным, наиболее важным являются измерения линий излучения газов в газовой ячейке – полный аналог полетных исследований. Такие измерения были проведены при участии автора в DLR, в качестве тестового газа выступал газ OCS, обладающий интенсивными и хорошо изученными линиями излучения в частотном диапазоне приема СИП. На рис. 4.12 представлена фотография

экспериментальной установки. На вход инструмента при помощи подвижного зеркала подавался попеременно сигнал с калибровочных холодной (77K) и горячей (300K) нагрузок и излучение газа OCS, находящегося в газовой ячейке при комнатной температуре.

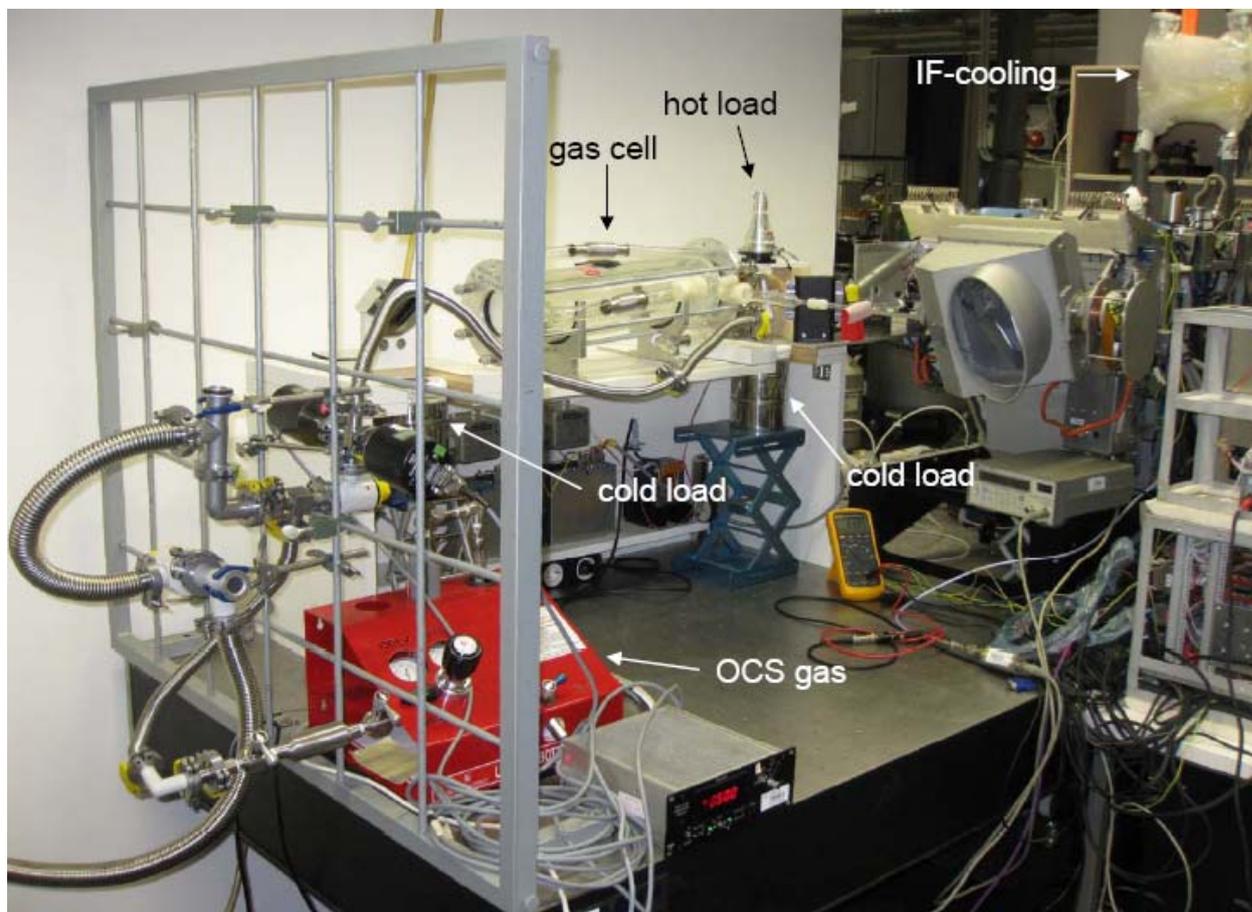


Рис. 4.12. Фотография экспериментальной установки [P. Vogt, 2010].

При измерениях исследовались две линии излучения примерно равной интенсивности, располагающиеся в разных полосах приема СИП с частотами 595.374 ГГц и 607.498 ГГц. Частота гетеродина варьировалась с шагом примерно 300 МГц. Таким образом, в тракте ПЧ наблюдались две линии излучения, изменяющие свое положение друг относительно друга. При совпадении частот в тракте ПЧ (частота гетеродина равна среднему арифметическому частот линий излучения – 601.436 ГГц) на частоте

6.062 ГГц видна одна линия излучения удвоенной интенсивности (см. рис. 4.13). Зная реальные интенсивности каждой из линий излучения при заданном давлении, можно определить коэффициент преобразования всего инструмента, а из него – соотношение полос приема сигнала.

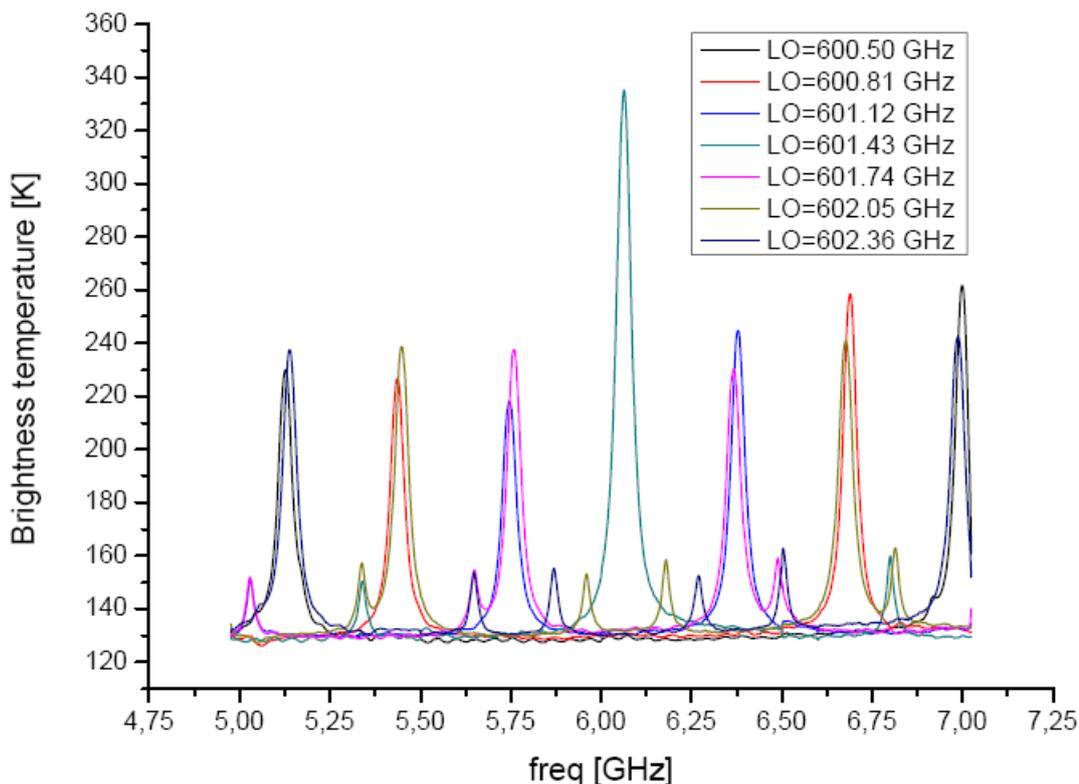


Рис. 4.13. Линии излучения газа OCS при варьировании частоты гетеродина.
[P. Vogt, 2010]

В процессе обработки спектров, полученных в результате полетных кампаний 2009 – 2010 гг., было обнаружено расхождение измеренных и модельных спектров почти на 30%. Такую ошибку нельзя было объяснить погрешностью измерения. Причиной такого расхождения, как стало ясно после анализа компонентов инструмента, оказалось насыщение по входу оконечного спектрометра - автокоррелятора производства компании Omnisys. Instruments. Данный спектрометр был разработан специально для инструмента TELIS. Ошибки, допущенные при проектировании входного тракта ПЧ спектрометра привели к тому, что насыщение происходило даже

при штатной мощности сигнала ПЧ. При измерениях в газовой ячейке известных линий излучения газа OCS, была обнаружена сильная зависимость измеряемой интенсивности линии излучения от рабочей точки управляемого СВЧ аттенюатора, установленного между выходом ПЧ СИП и входом автокоррелятора. На рис. 4.14 представлена зависимость измеряемой интенсивности линии излучения от мощности сигнала ПЧ (аттенюация от 5 до 13 дБ). Реальная интенсивность линии излучения определяется температурой ячейки и отмечена на графике пунктирной линией. По результатам исследования в систему обработки ранее измеренных спектров были введены поправочные коэффициенты, учитывающие нелинейность спектрометра. Все последующие измерения были проведены при меньшем уровне входного сигнала автокоррелятора.

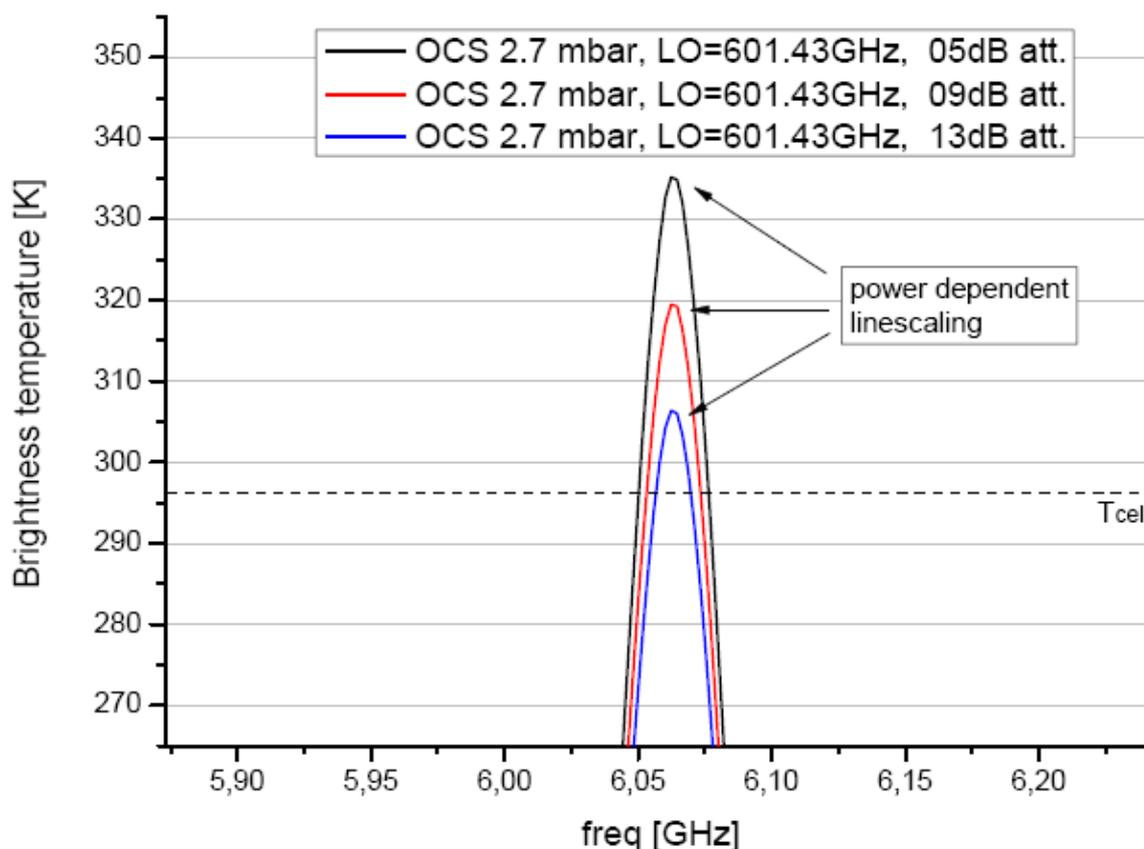


Рис. 4.14. Демонстрация нелинейности работы автокоррелятора – зависимость измеренной интенсивности линии излучения от мощности сигнала ПЧ. [P. Vogt, 2010]

4.4. Полетные кампании инструмента TELIS, некоторые полученные результаты.

Итогом многолетней работы по созданию инструмента TELIS стали три успешных запуска, произведенные с полигона Esrange (находится в приполярной Швеции) в марте 2009, январе 2010 и марте 2011 года. Инструмент располагался в гондole высотного аэростата совместно с инструментом MIPAS-B. Все запуски преследовали следующие научные цели: исследование водного цикла в приполярных областях стратосферы путем измерения концентрации ее изотопов, наблюдение за процессом каталитического разрушения озона соединениями хлора и исследование содержания соединений брома в стратосфере. Более того, результаты этих измерений были использованы для привязки данных, полученных со спутников MIPAS + SCIMACHY/Envisat, MLS Aura и SMILES, решающих во многом схожие научные задачи.

Перед каждой кампанией составляется план полетных измерений – в какое время и спектральные линии каких веществ планируется измерять. Частота гетеродина выбирается таким образом, чтобы в полосу приема попало как можно больше спектральных линий исследуемых веществ. Так как перестройка частоты гетеродина СИП занимает некоторое время, количество рабочих частот было минимизировано. Были выбраны 9 так называемых полетных частот. Вся предполетная оптимизация рабочих параметров СИП, описанная в главах 2 и 3, проводилась именно для этих частот. Ниже представлена таблица полетных частот и соответствующих им веществ.

Таблица 1. Полетные частоты гетеродина и соответствующие им вещества.

#	Частота гетеродина, ГГц	Исследуемое вещество
1	495.04	$\text{H}_2\text{-}^{18}\text{O}$, H_2O и изотопы
2	496.88	HDO , H_2O и изотопы
3	505.6	BrO
4	507.28	ClO
5	515.25	O_2 , H_2CO , H_2O_2 , HNO_3
6	519.25	BrO , HNO_3 , NO_2
7	546.76	$\text{H}_2\text{-}^{17}\text{O}$
8	607.78	O_3 , $^{16}\text{ }^{16}\text{ }^{18}\text{O}_3$, $^{16}\text{ }^{18}\text{ }^{16}\text{O}_3$; ClO , HOCl , H_2O_2 , HNO_3 , N_2O_2
9	619.1	HCl , HOCl , ClO

Гондола с научными инструментами прикреплялась к высотному аэростату, наполненному гелием. Между аэростатом и гондолой находится парашют, на котором гондола спускается на землю после окончания измерений и отцепки аэростата. В 2009 и 2010 годах запуск производился с использованием одного несущего аэростата и специального подвижного крана, на котором подвешена гондола в момент запуска (см. рис. 4.15). При достижении аэростатом достаточной подъемной силы гондола отцепляется от крана и безопасно взлетает. В 2011 году была использована другая система запуска с применением небольших поддерживающих аэростатов, не позволяющих инструменту упасть на землю в процессе подъема основного аэростата.



Рис. 4.15. Запуск инструмента TELIS-MIPAS с полигона ESRANGE, Швеция;
Март 2009. Объем аэростата: 400 000 м³;
Вес полезной нагрузки: 1 200 кг.

Все три полета происходили по схожему сценарию. Запуск производился ночью, в 1 – 1:30 утра, в зависимости от метеоусловий в точке запуска. СИП был включен на земле и во время всего подъема производился контроль параметров прибора, в первую очередь – температуры образца, температуры блоков смещения и их батарей. Контроль этих параметров именно во время подъема имеет большое значение – на высоте примерно 10 км, в тропопаузе, температура воздуха вокруг криостата опускалась ниже -90°C. Через 30 минут после запуска аэростат поднимался до высоты, на которой начинались измерения спектров излучения атмосферы. Примерно через 3 часа после запуска инструмент достигал рабочей высоты 35 км.

Сразу после подъема, на рабочей высоте проводились «ночные», референсные измерения спектров газов. Особый интерес представляли измерения во время восхода солнца – в процессе активации химических соединений в атмосфере. К окончанию полета были получены сотни

спектров различных газов. Продолжительность полетов достигала 12 часов и ограничивалась только радиусом действия радиоканала и соображениями безопасности – приземление желательно производить в малонаселенных районах. Основным фактором, определяющим время полета, является скорость и направление ветра на рабочей высоте. Все три приземления произошли штатно - ни гондола, ни инструменты не пострадали.

Особо следует отметить запуск в январе 2010 года – в месте запуска находился центр атмосферного вихря, и весь 12-часовой полет аэростат оставался в этой области, что позволило получить уникальные научные данные. К примеру, была измерена зависимость концентрации ClO от высоты во время восхода солнца (см. рис. 4.16). Одним из основных достижений кампании 2010 года является измерение линии излучения BrO, обладающей предельно малой интенсивностью – 0.3 К (см. рис. 4.17).

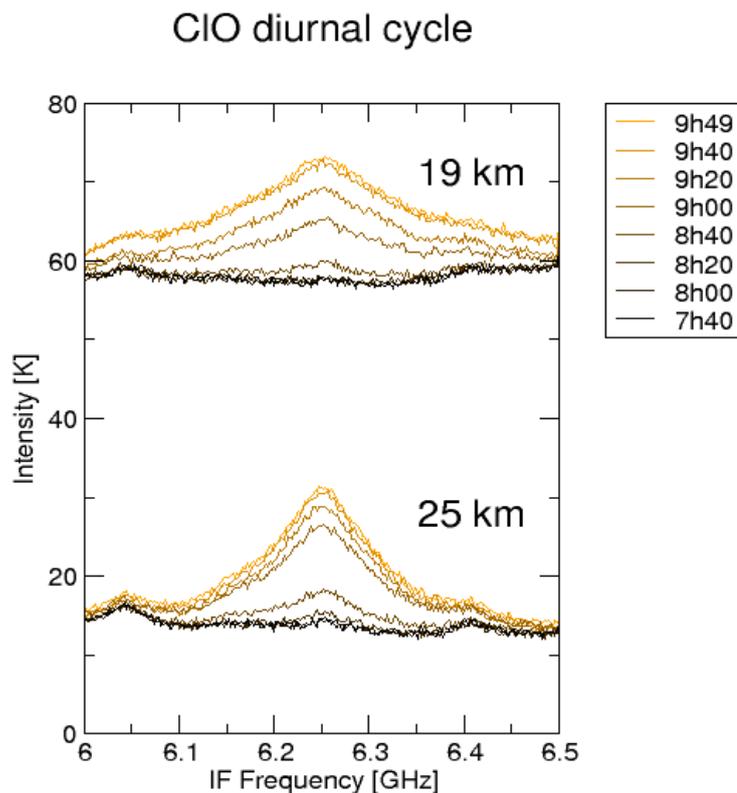


Рис. 4.16. Спектры, измеренные СИП. Наблюдается увеличение концентрации ClO во время восхода солнца. Частота гетеродина - 495 ГГц. Представлены результаты для двух высот наблюдения – 19 и 25 км [A.de Lange, 2010].

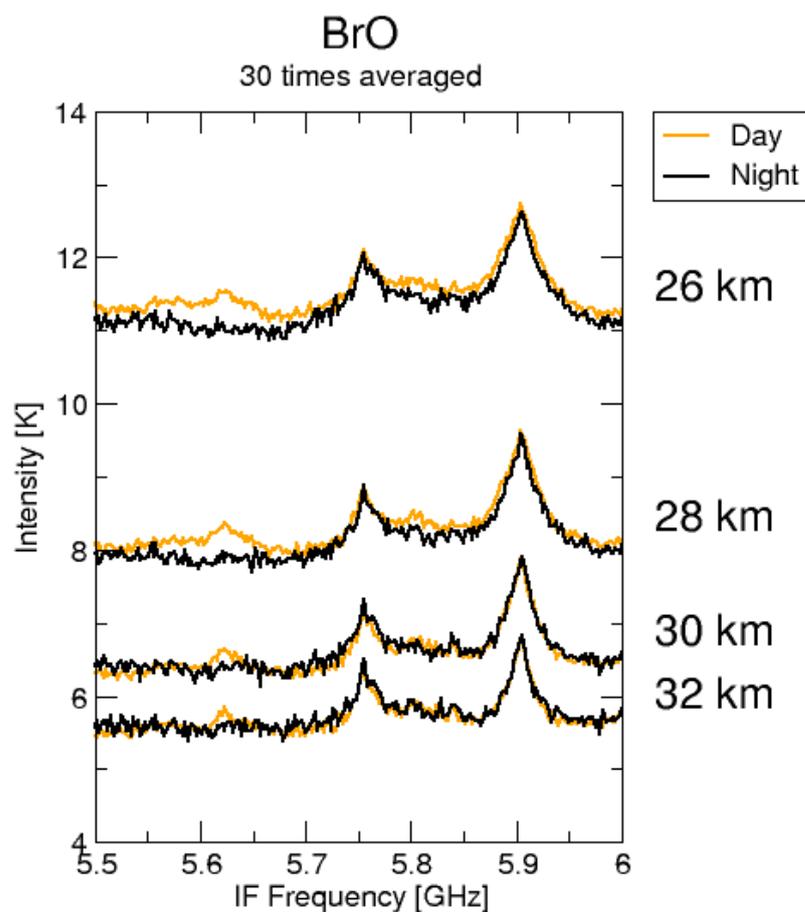


Рис. 4.17. Спектры, измеренные днем и ночью для четырех значений высоты наблюдения. Линия BrO активируется днем на частоте ПЧ примерно 5.6 ГГц [A.de Lange, 2010].

Огромный объем данных, полученных за три успешных полетных кампании, все еще находится в стадии углубленной обработки, выполняемой нашими голландскими коллегами. Причина заключается в том, что качественно данные совпадали с модельными, а количественно – отличались от них примерно на 30 %. Такая ошибка обусловлена уже упомянутыми в п. 4.4 проблемами с нелинейностью оконечного спектрометра. Во время недавней тестовой кампании были определены поправочные коэффициенты, и предварительные результаты анализа полетных данных с учетом нелинейности, уже полностью совпадают с расчетными. Проблема решена, и статья по научным результатам полетов уже готовится к печати.

4.5. Выводы главы.

- 1) Во время трех научных запусков инструмента TELIS на высотном аэростате в 2009-2011 годах обеспечено бесперебойное функционирование и перестройка спектрометра в диапазоне 495 – 620 ГГц. Продолжительность непрерывных измерений во время полета инструмента достигала 11 часов (кампания 2010 года). В течение всего этого времени производился удаленный контроль рабочих параметров прибора и перестройка частоты гетеродина на основе РДП. В процессе полета при неблагоприятных внешних условиях время перестройки частоты гетеродина и полной оптимизации рабочей точки в среднем составляло 1,5 минуты.
- 2) Благодаря разработанным алгоритмам управления СИП во время нескольких тестовых и трех полетных кампаний была обеспечена бесперебойная работа спектрометра в режиме фазовой синхронизации гетеродина и его перестройка в диапазоне 495 – 619 ГГц.
- 3) Оптимизация рабочих точек на всех частотах, специфицированных в полетном задании сверхпроводникового интегрального приемника в составе инструмента TELIS, позволила достичь наилучшей, среди устанавливаемых на аэростаты приборов, предельной чувствительности. Это дало возможность измерить десятки спектральных линий газов в атмосфере, изучить их зависимости от высоты наблюдения и времени. Зарегистрированы спектры HDO, O₂, O₃ (с изотопами), HCl, HOCl, H₂¹⁸O, NO₂, ClO, BrO, расположенные в диапазоне 488 - 626 ГГц.
- 4) Разработанные алгоритмы оптимизации и измерения позволили в ходе кампании 2010 года впервые измерить на частоте 519.25 ГГц спектральную линию BrO с предельно малой интенсивностью 0.3 К.

5. Применение СИП для исследования газовых смесей в лабораторных условиях.

Успехи в разработке и применении СИП для спектроскопии атмосферы позволили расширить область его применения и использовать СИП в качестве высокоточного лабораторного спектрометра для исследования состава газовых смесей. Достоинства СИП, сыгравшие решающую роль при его выборе в качестве приемного элемента инструмента TELIS, такие как компактность установки, широкий диапазон перестройки гетеродина и высокая чувствительность, являются решающими и для применения спектрометра в качестве коммерческого прибора.

Была начата работа по созданию спектрометра для медицинских применений (исследование химического состава выдыхаемого воздуха). В последнее время анализ выдыхаемого воздуха стал использоваться для диагностики все расширяющегося круга заболеваний. Присутствие в выдыхаемом воздухе аномальных химических соединений позволяет судить о наличии того или иного патологического процесса в организме на основании измерений концентрации веществ-маркеров в выдыхаемом воздухе, что позволяет проводить раннюю диагностику многих заболеваний. Основная проблема анализа состоит в необходимости обнаружения микроконцентраций молекул маркеров в многокомпонентной газовой смеси. Для решения этой задачи требуются приемники и спектрометры субмм диапазона длин волн с предельной чувствительностью и высоким спектральным разрешением. В данной главе описана работа по созданию экспериментальной установки для проведения таких спектрометрических исследований.

Для регистрации спектров было использовано два метода измерений. Изначально было предложено применить так называемую пассивную схему измерений, где линии излучения и поглощения веществ исследуются на фоне излучения абсолютно черного тела известной температуры. Такая методика

является лабораторным аналогом атмосферных измерений, отработанных во время полетов инструмента TELIS.

Помимо традиционной пассивной методики проведения измерений был использован метод нестационарной когерентной спектроскопии, разработанный в ИПФ РАН. В данной методике вместо широкополосного излучения абсолютно черного тела используется перестраиваемый узкополосный генератор субмиллиметрового диапазона, поэтому по аналогии с пассивной схемой измерений данный метод далее будет называться активным.

5.1. Установка исследования газов пассивным методом.

Принцип пассивного метода измерения заключается в следующем: между широкополосным источником СВЧ излучения и приемником располагается кювета с исследуемым газом. Приемник принимает сигнал на частотах порядка 600 ГГц, затем преобразует его вниз в полосу промежуточных частот (4 – 8 ГГц), данный сигнал затем анализируется окончательным спектрометром, что для данной полосы частот не представляет принципиальных проблем. Сигнал затем пересчитывается в пропускание; пропускание пустой ячейки принимается за единицу. На определенных частотах, определяемых физическими свойствами молекулы, возникает резонансное поглощение излучения, то есть появляются провалы в характеристике пропускания. Таким образом исследуются газы при различных давлениях.

Основной целью исследования является определение концентрации исследуемого вещества в растворе, используя характеристики пропускания газа, выпаренного из этого раствора. Особенностью пассивной методики является простота экспериментальной установки, наглядность получаемых результатов. Из недостатков следует отметить высокие требования к окончательному спектрометру, а также зависимость результатов от внешних параметров, к примеру, температуры окружающей среды, а также невысокое

соотношение сигнал/шум в полученных спектрах. Далее представлены результаты экспериментальной проверки пассивной методики на примере аммиака и перекиси водорода. Использовались растворы заранее известной концентрации, и производилось измерение спектров поглощения при различных давлениях газа в ячейке. Полученные спектры обрабатывались, выделялась зависимость коэффициента пропускания от частоты, а затем сравнивалась с результатами, полученными по формуле Бугера-Ламберта-Бера (см. ниже). Схема созданной специально для этих исследований экспериментальной установки представлена на рис. 5.1.

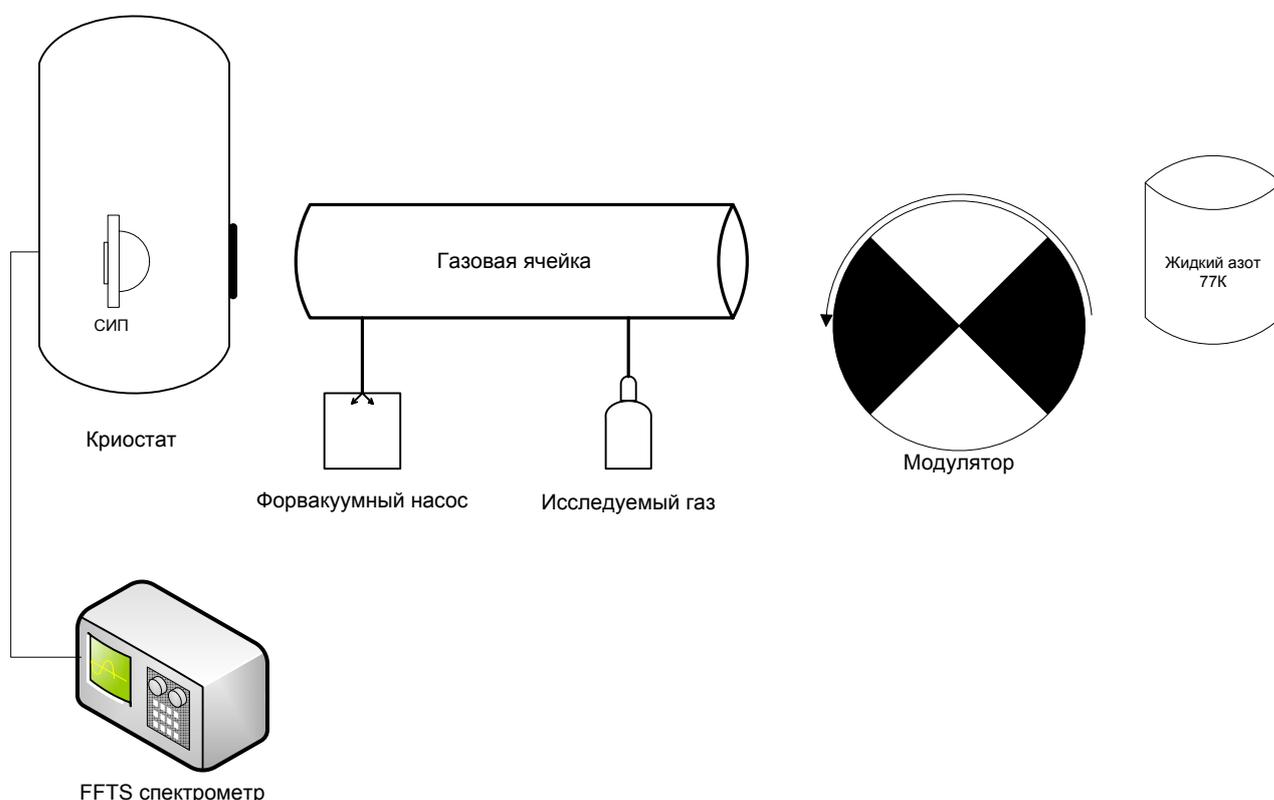


Рис. 5.1. Схема экспериментальной установки для измерения спектров пассивным методом.

Для пересчета спектра поглощения в концентрацию молекул в газовой ячейке использовался закон Ламберта-Бугера-Бера - физический закон,

определяющий ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде.

Закон выражается следующей формулой:

$$I(l) = I_0 e^{-k_\lambda l}, \quad (5.1)$$

где I_0 — интенсивность входящего пучка, l — толщина слоя вещества, через которое проходит свет, k_λ — показатель поглощения. Показатель поглощения характеризует свойства вещества и зависит от длины волны λ поглощаемого света.

Для растворов поглощающих веществ в непоглощающих растворителях показатель поглощения может быть записан как

$k_\lambda = \chi_\lambda \cdot C$, где χ_λ коэффициент, характеризующий взаимодействие молекулы поглощающего вещества со светом длины волны λ , C — концентрация растворённого вещества.

Выражение (5.1) можно преобразовать следующим образом:

$\ln(T_\lambda) = -\chi_\lambda \cdot C \cdot l$, где T_λ — коэффициент пропускания (Transmission), зависящий от частоты (длины волны).

Далее, перейдя к частотам и проинтегрировав по ширине линии поглощения, получаем:

$$\int_{df} (-\ln(T_f)) = S \cdot C \cdot l, \quad (5.2)$$

где df — это ширина линии поглощения, S — интегральная интенсивность линии поглощения, C — концентрация молекул исследуемого газа и l — длина газовой ячейки.

Интегральная интенсивность линии поглощения (S) — для различных газов при комнатной температуре — справочная величина и содержится, к примеру, в каталоге JPL — Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology [49].

Обозначим интеграл, стоящий в левой части выражения (5.2), как T_{int} , его легко вычислить из измеренных спектров поглощения (см. рис. 5.2).

Введя процентное содержание исследуемого вещества в исходном растворе (A), учитывая длину ячейки 50 см. и применив уравнение состояния идеального газа, получим следующую зависимость:

$$T_{\text{int}} = S \cdot P \cdot \frac{3.6 \cdot 10^{20}}{\frac{100}{A} + 1}, \quad (5.3)$$

где $[T_{\text{int}}] = \text{MHz}$, $[S] = \text{cm}^{-1}/(\text{molecule}/\text{cm}^2)$, $[P] = \text{mBar}$.

Данная формула может быть использована для определения процентного содержания исследуемого вещества в растворе, либо для проверки экспериментальной установки при заданной концентрации.

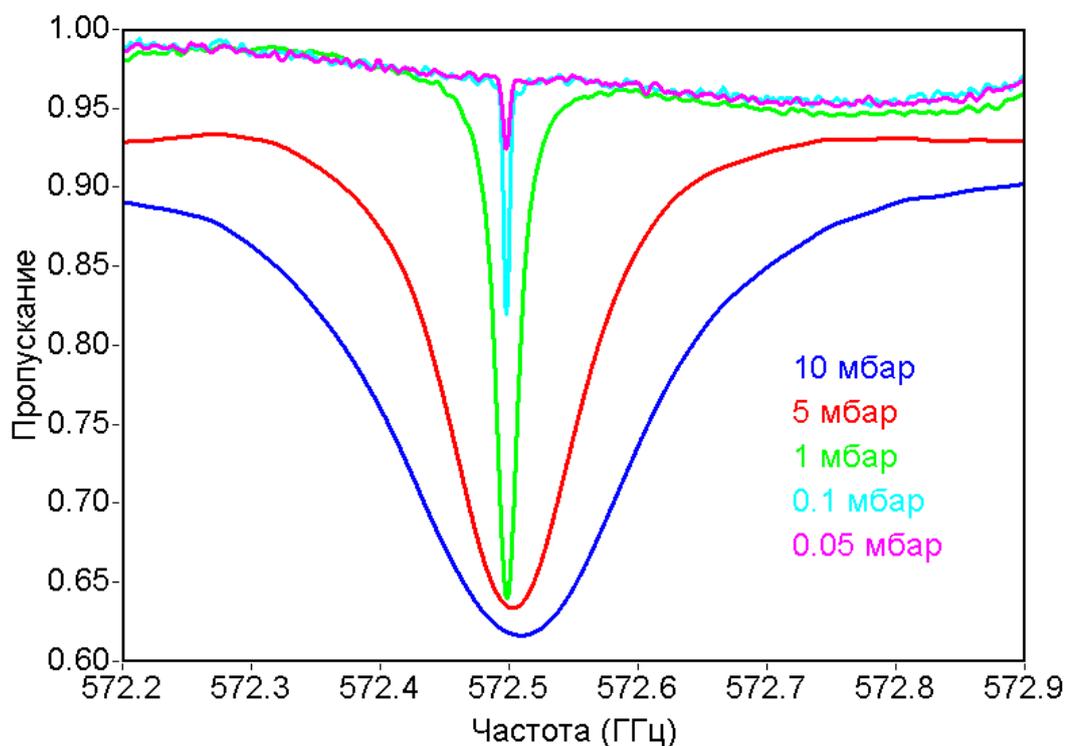


Рис. 5.2. Зависимость спектра пропускания паров 10% раствора аммиака от давления в газовой ячейке. Частота РДП 572.498 ГГц.

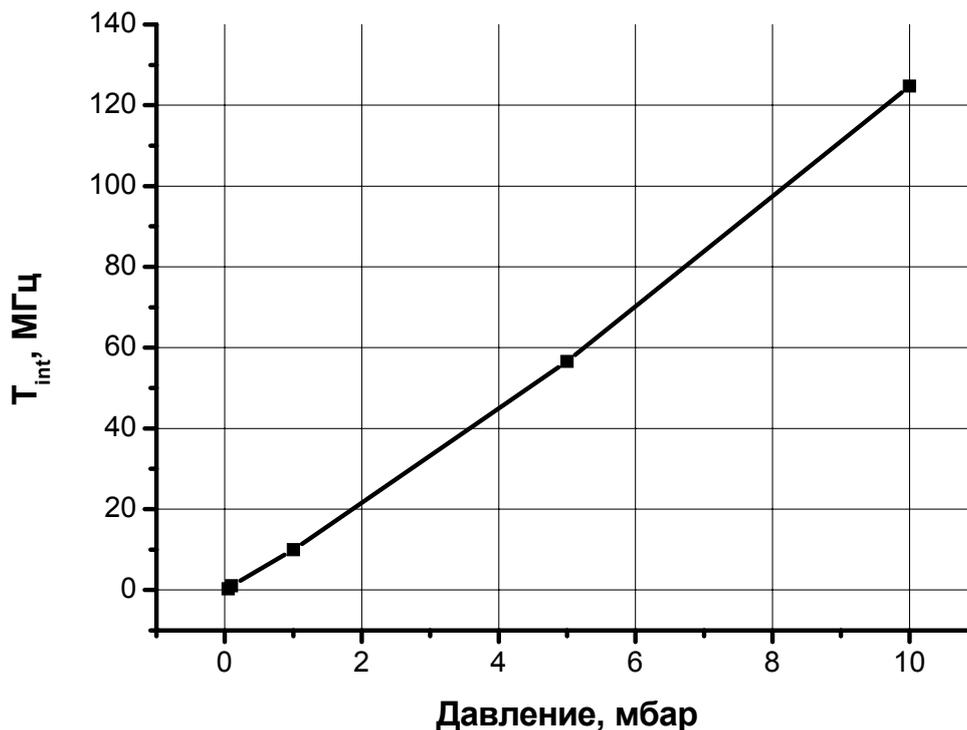


Рис. 5.3. Зависимость интеграла поглощения (T_{int}), рассчитанного по измеренным данным от давления.

Для экспериментальной проверки методики были использованы измерения спектра пропускания 10% раствора аммиака в зависимости от давления в газовой ячейке. Интенсивность линии аммиака на частоте 572.498 ГГц $S_{572} = 2.6 \cdot 10^{-21}$.

Были произведены расчеты интеграла поглощения (T_{int}) для каждого измеренного спектра (давления). Из формулы (5.3) следует, что зависимость линейная, произведя аппроксимацию полученных данных (см. рис.5.3), из формулы (5.3) был произведен расчет концентрации аммиака в исходном растворе, равный 13%, что с достаточной точностью соответствует концентрации реального раствора.

Также были исследованы спектральные линии 30% раствора перекиси водорода. На рис. 5.4 представлены спектры пропускания газовой ячейки при различных значениях давления в ней. В качестве окончного спектрометра в

эксперименте использовался FFTS, поэтому было проведено понижение частоты ПЧ до 0 – 1.5 ГГц. На спектре представлены линии поглощения – левая – перекись водорода (частота 606.71752 ГГц), линии справа – вода (частота 620.700887 ГГц). Полученные характеристики наглядно демонстрируют почему, в частности, невозможна работа при атмосферном давлении – линии воды, присутствующей в воздухе, обладают высокой интенсивностью, и на их фоне не будут заметны линии поглощения других газов.

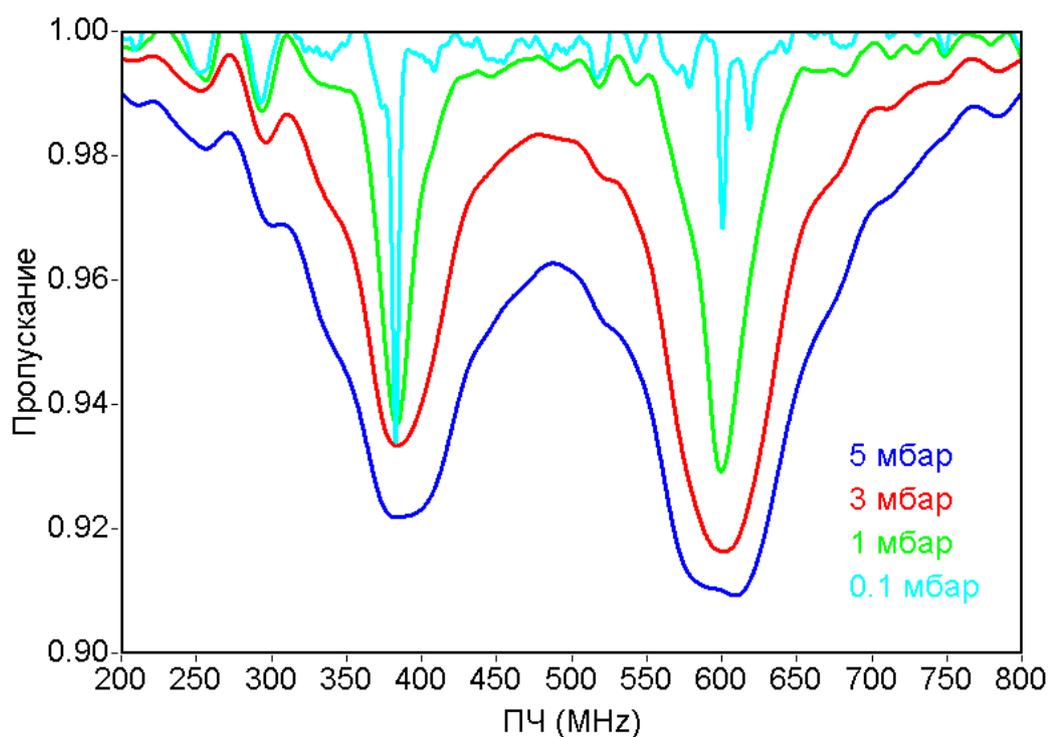


Рис. 5.4. Зависимость пропускания паров 30% раствора перекиси водорода от давления в газовой ячейке. Частота гетеродина 613.6 ГГц.

Исследования спектра поглощения перекиси водорода были продолжены, и при частоте гетеродина 607 ГГц были зарегистрированы одновременно 2 линии поглощения, с частотами 599.723 ГГц и 612.235 ГГц (см. рис. 5.5). Таким образом, было продемонстрирована возможность надежного детектирования и измерения концентрации перекиси водорода при помощи пассивной методики измерения.

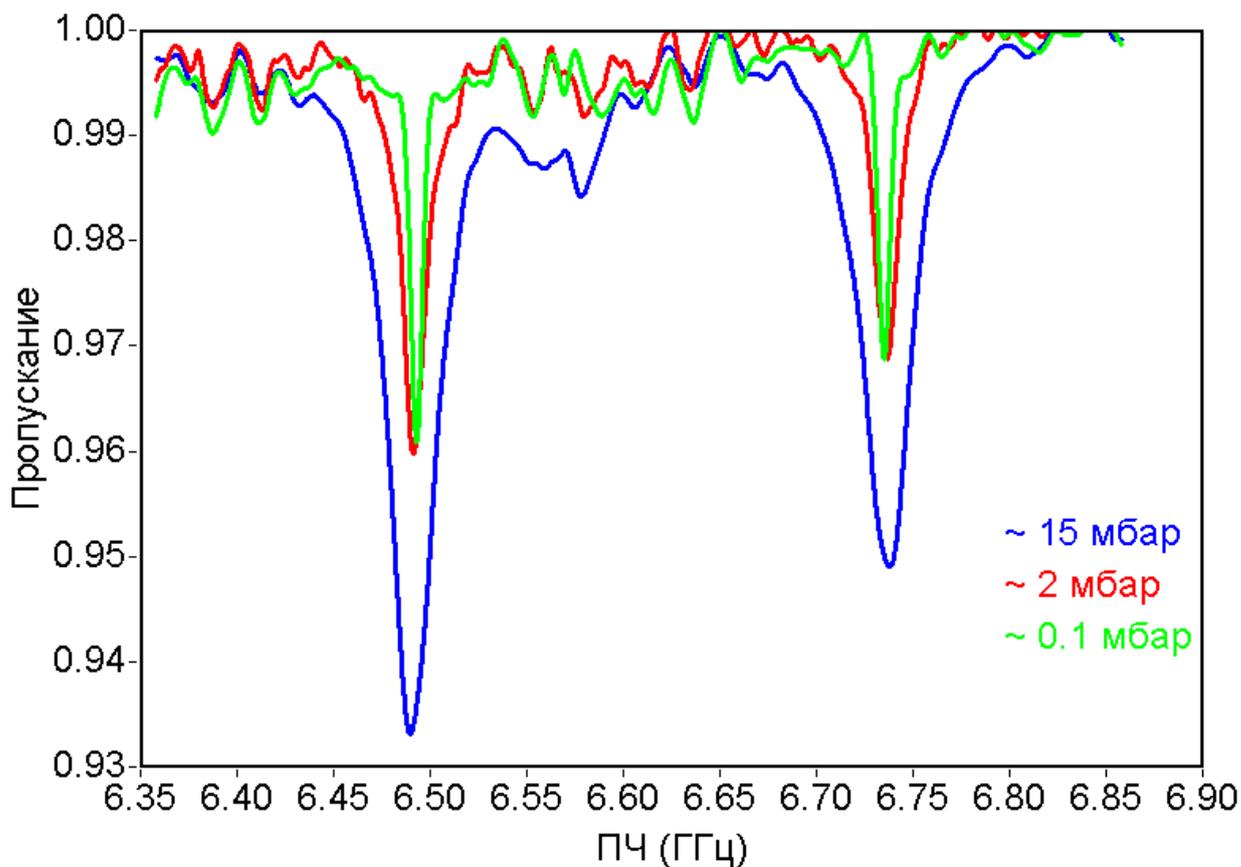


Рис. 5.5. Зависимость пропускания паров 30% раствора перекиси водорода от давления в газовой ячейке. Частота гетеродина 607 ГГц.

Применение пассивной методики измерения можно найти в калибровке и проверке измерительной установки – при заданных рабочих параметрах интегрального приемника и заданном давлении в газовой ячейке мы должны получать абсолютно одинаковый результат, обусловленный физикой процесса поглощения излучения в среде.

5.2. Установка исследования газов активным методом.

Помимо традиционной пассивной методики проведения измерений был использован метод нестационарной когерентной спектроскопии газов, разработанный в ИПФ РАН. Суть метода заключается в использовании в качестве источника СВЧ узкополосного генератора терагерцового излучения с частотой, совпадающей со спектральной линией исследуемого вещества. В

используемой конфигурации используется ЛОВ с частотой генерации 120 – 160 ГГц, сигнал которого затем поступает на умножитель на полупроводниковых сверхрешетках. Выходная мощность сигнала на выходе умножителя – не менее 0.2 мкВт. Излучение генератора модулируется по частоте, а синхронная система регистрации детектирует уровень сигнала ПЧ на выходе СИП. При точном совпадении частоты излучения с частотой поглощения газа в ячейке уровень сигнала ПЧ уменьшается. На выходе синхронного детектора получаем зависимость производной уровня сигнала ПЧ от частоты (см. рис. 5.8); по размаху этой производной можно определить концентрацию газа в ячейке. Указанный метод в перспективе позволяет получить более высокую чувствительность, хотя и требует использования дополнительного оборудования. Помимо интегрального приемника требуется дополнительный СВЧ генератор для накачки умножителя на полупроводниковых сверхрешетках с собственной системой ФАПЧ и специальная система синхронной регистрации отклика. На рис. 5.6 представлена функциональная схема экспериментальной установки, а на рис. 5.7 – ее общий вид.

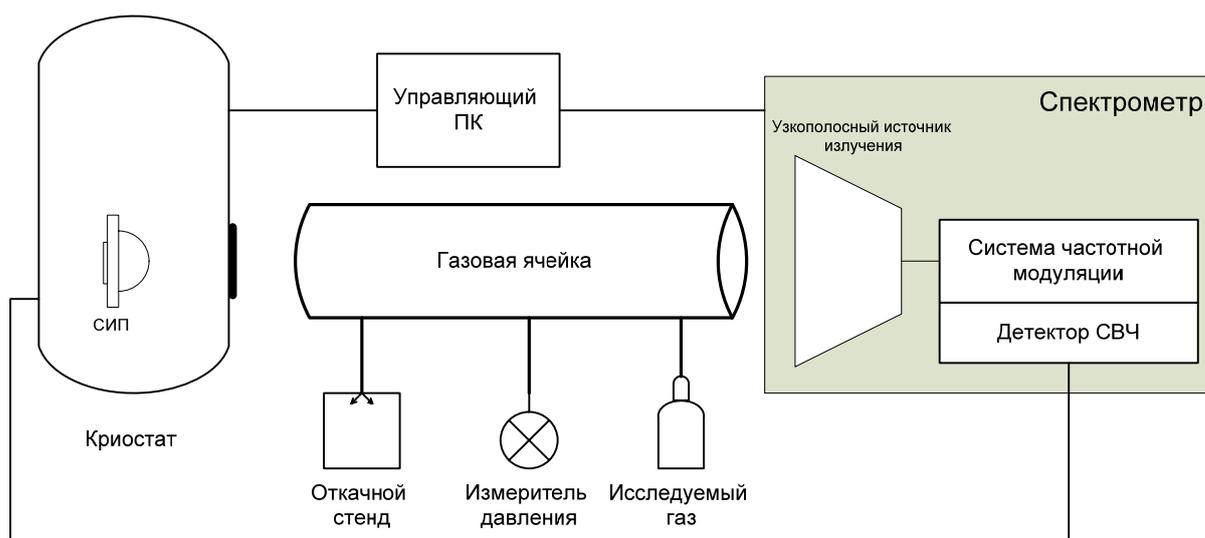


Рис. 5.6. Функциональная схема экспериментальной установки для анализа выдыхаемого воздуха



Рис. 5.7. Фотография лабораторной установки для исследования спектров поглощения газов.

Исследование спектров поглощения газов производились в стандартной газовой ячейке из нержавеющей стали. Напуск газа производился после двойной откачки ячейки до давления менее 0.005 мбар для исключения влияния предыстории эксперимента. После напуска исследуемого газа производилась постепенная откачка до рабочих давлений. Измерения производились в диапазоне давлений 0.5 – 0.01 мбар. При больших давлениях заметное влияние начинало оказывать уширение линии, при меньших давлениях уровень полезного сигнала становился сравнимым с уровнем шумов. Отработка методики измерения концентрации газа производилась на растворах аммиака, ацетона и перекиси водорода.

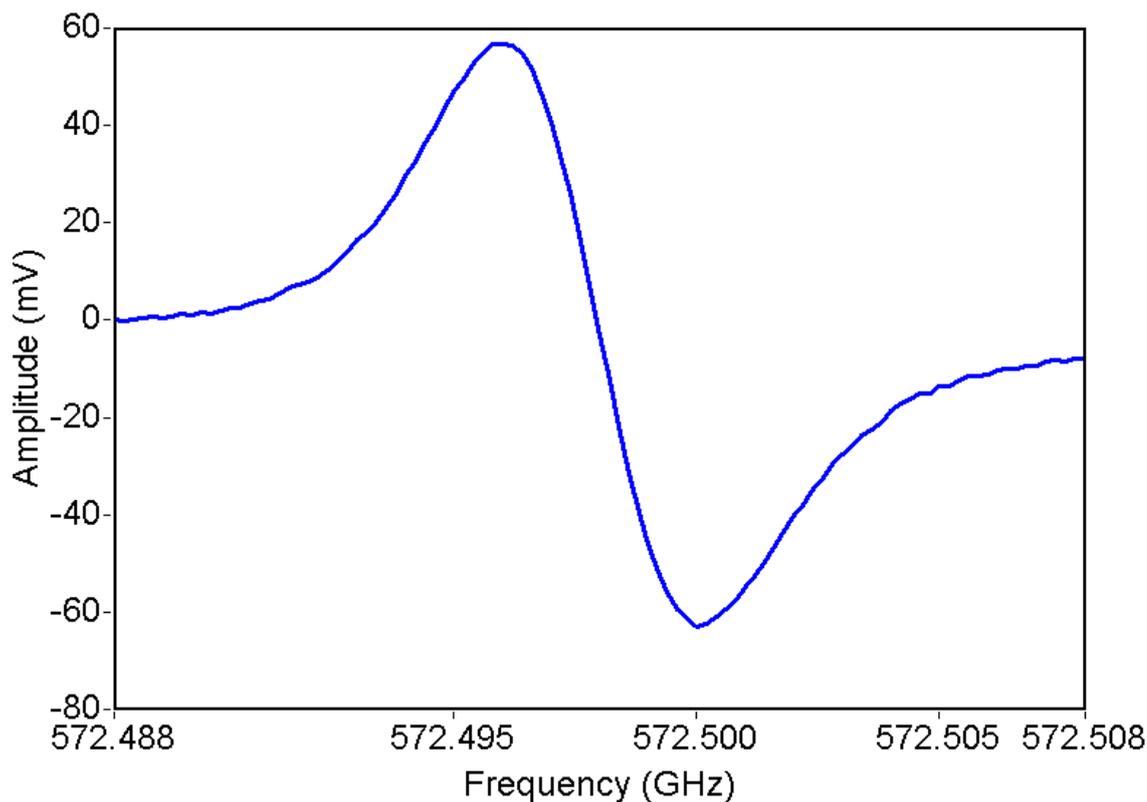


Рис. 5.8. Общий вид отклика прибора. Исследуемый газ – пары 0.01% раствора аммиака. Давление в ячейке 0.3 мбар. Исследуемая линия поглощения - 572.498 ГГц.

Были также исследованы линии поглощения паров ацетона высокой концентрации. Результаты представлены на рис. 5.9. По сравнению с аммиаком, линия поглощения ацетона обладает меньшей интенсивностью, поэтому отклик прибора при малых концентрациях раствора меньше и шумы установки становятся более заметными. Из зависимости на рис. 5.9 также видно, что оптимальное рабочее давление составляет примерно 0.07 мбар.

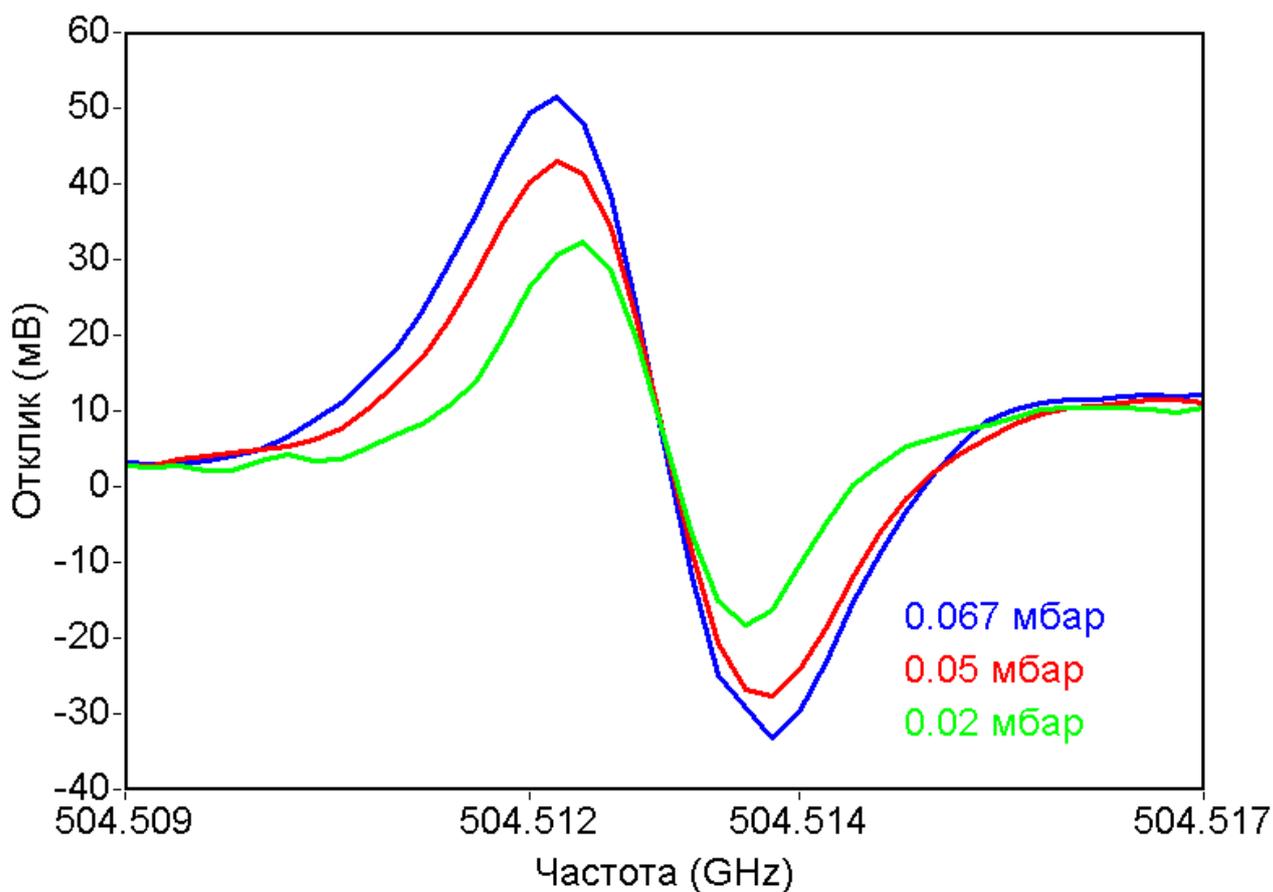


Рис. 5.9. Зависимость отклика прибора от давления. Исследуемый газ – пары ацетона. Исследуемая линия поглощения – 504.514 ГГц.

Предварительный анализ полученных данных показал, что нестационарный метод обладает большей чувствительностью и позволяет проводить весь цикл измерений за 1-2 мин. Все это делает метод с использованием дополнительного генератора гораздо более перспективным для практических приложений в области неинвазивной медицинской диагностики.

В настоящий момент мы столкнулись с ситуацией, что при исследовании малых концентраций исследуемых веществ (десятки ppb) даже чувствительности СИП недостаточно для надежного детектирования некоторых веществ. Выход – увеличение оптического пути, проходимого ТГц излучением в газовой ячейке на котором происходит его поглощение.

Однако значительно увеличить размеры газовой ячейки невозможно, поэтому было принято решение об использовании многопроходовых газовых ячеек, а также газовых ячеек – резонаторов с контролируемой добротностью.

5.3. Выводы главы

- 1) Впервые прибор со сверхпроводниковым генератором гетеродина, стабилизированный по частоте системой ФАПЧ, был использован для спектроскопии газов высокого разрешения, продемонстрирована возможность использования сверхпроводникового интегрального приемника для спектрометрии газовых смесей в газовой ячейке на примере перекиси водорода и аммиака.
- 2) Созданы две установки для спектрометрического исследования газовых смесей в лабораторных условиях – методами нестационарной и стационарной спектрометрии. На первой установке на фоне переключаемой нагрузки были исследованы спектры поглощения перекиси водорода, а на второй - продемонстрировано надежное детектирование паров аммиака концентрацией около 100 ppm.
- 3) Исследована зависимость поглощения паров перекиси водорода, аммиака и ацетона в газовой ячейке в зависимости от давления (от 0.5 мбар до 0.01 мбар) и концентрации (до 100 ppm) исследуемого вещества. Данные соединения являются биомаркерами - индикаторами заболеваний, повышенная концентрация которых в выдыхаемом воздухе свидетельствует о наличии определенных заболеваний.

Заключение

В ходе выполнения диссертационной работы получены следующие результаты:

1. Экспериментально исследованы спектральные, шумовые и вольт-амперные характеристики сверхпроводникового интегрального приемника. Исследована резонансная структура на вольт-амперных характеристиках РДП (ступени Фиске), измерены зависимости ширины линии генерации от положения рабочей точки на ступени Фиске. На основании полученных зависимостей предложены и испытаны универсальные алгоритмы выставления частоты генерации РДП во всем рабочем диапазоне приемника (от 450 до 650 ГГц). Подстройка положения рабочей точки в пределах одной ступени Фиске позволила реализовать в данном режиме ширину автономной линии генерации порядка 1 МГц.
2. Исследованы наиболее важные элементы сверхпроводникового интегрального приемника – РДП, СИС – смеситель, гармонический смеситель, система ФАПЧ, созданы алгоритмы оптимизации рабочих параметров и режимов работы всех элементов. В результате проведенных оптимизаций СИС-смесителя и РДП с целью максимизации чувствительности СИП минимальная шумовая температура приемника в составе инструмента TELIS составила 150 К. Совместная оптимизация режимов работы гармонического смесителя и системы ФАПЧ позволила реализовать фазовую стабилизацию сверхпроводникового генератора гетеродина во всем диапазоне частот приемника 450 - 650 ГГц.
3. Во время трех научных запусков инструмента TELIS на высотном аэростате в 2009-2011 годах обеспечено бесперебойное функционирование и перестройка спектрометра в диапазоне 495 – 620

ГГц. Продолжительность непрерывных измерений во время полета инструмента достигала 11 часов (кампания 2010 года). В течение всего этого времени производился удаленный контроль рабочих параметров прибора и перестройка частоты гетеродина на основе РДП. В процессе полета при неблагоприятных внешних условиях время перестройки частоты гетеродина и полной оптимизации рабочей точки в среднем составляло 1,5 минуты.

4. Оптимизация рабочих точек на всех частотах, специфицированных в полетном задании сверхпроводникового интегрального приемника в составе инструмента TELIS, позволила достичь наилучшей, среди устанавливаемых на аэростаты приборов, предельной чувствительности. Это дало возможность измерить десятки спектральных линий газов в атмосфере, изучить их зависимости от высоты наблюдения и времени. Зарегистрированы спектры HDO, O₂, O₃ (с изотопами), HCl, HOCl, H₂¹⁸O, NO₂, ClO, BrO, расположенные в диапазоне 488 - 626 ГГц.
5. Созданы две установки для спектрометрического исследования газовых смесей в лабораторных условиях – методами нестационарной и стационарной спектрометрии. На первой установке на фоне переключаемой нагрузки были исследованы спектры поглощения перекиси водорода, а на второй - продемонстрировано надежное детектирование паров аммиака концентрацией около 100 ppm. Проведены исследования зависимости поглощения аммиака от давления, температуры и процентного содержания исследуемого газа в ячейке.

Список публикаций автора

- [A1]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, “Integrated Submillimeter Receiver for TELIS”, *“IEEE Trans. on Appl. Supercond.”*, vol. 17, pp. 336-342, 2007
- [A2]. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Борисов В.Б., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., **Киселев О.С.**, Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В., Ягубов П.А., “Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона длин волн для атмосферных исследований”, *Известия ВУЗов «Радиофизика»*, Том L, № 10–11, стр. 935-940, 2007.
- [A3]. В.Л. Вакс, В.Ю. Балакирев, А.Н. Панин, С.И. Приползин, В.П. Кошелец, **О.С. Киселев**. Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра диапазона 500–700 ГГц со сверхпроводниковым интегральным приемником. // *Физика твердого тела*, 2010, том 52, вып. 11, с. 2100-2103.
- [A4]. 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., Arno de Lange, Gert de Lange, Pavel A. Yagoubov, «Сверхпроводниковый интегральный приёмник субмиллиметрового диапазона», *Успехи современной радиоэлектроники*, №5, стр. 75-81, 2010.
- [A5]. Valery P Koshelets, Manfred Birk, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey B Ermakov, Lyudmila V Filippenko, Hans Golstein, Ruud W M Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V Khudchenko, Nickolay V Kinev, **Oleg S Kiselev**, Pavel V Kudryashov, Bart van Kuik, Arno de Lange, Gert de Lange, Irina L Lapitsky, Sergey I Pripolzin, Joris van

Rantwijk, Avri M Selig, Alexander S Sobolev, Mikhail Yu Torgashin, Vladimir L Vaks, Ed de Vries, Georg Wagner, Pavel A Yagoubov, “Integrated Submm Wave Receiver: Development and Applications”, - Chapter in the book “Nanoscience Frontiers - Fundamentals of Superconducting Electronics”, Springer Serie: Nanoscience and Technology_35372, pp. 263-296, Editor: Anatolie Sidorenko, (2011).

[A6]. Gert de Lange, Dick Boersma, Johannes Dercksen, Pavel Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Hans Golstein, Ruud W.M. Hoogeveen, Leo de Jong, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, **Oleg S. Kiselev**, Bart van Kuik, Arno de Lange, Joris van Rantwijk, Alexander S. Sobolev, Mikhail Yu. Torgashin, Ed de Vries, Pavel A. Yagoubov, and Valery P. Koshelets, “Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder”, Supercond. Sci. Technol. vol. 23, No 4, 045016 (8pp), (2010).

[A7]. **Kiselev, O.** Birk, M. Ermakov, A. Filippenko, L. Golstein, H. Hoogeveen, R. Kinev, N. van Kuik, B. de Lange, A. de Lange, G. Yagoubov, P. Koshelets, V, “Balloon-Borne Superconducting Integrated Receiver for Atmospheric Research”, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Volume: 21 NO. 3, June 2011, pp 612-615

[A8]. A.S. Sobolev, P.V. Kudryashov, **O.S. Kiselev**, “Flux-flow Oscillator with Anticorrelated Noise on the Bias Current and the Magnetic Field.”, Journal of Physics: Conference Series 234 (2010)

[A9]. **Киселев О.С.**, Ермаков А.Б., Кошелец В.П. “Алгоритмы управления сверхпроводниковым интегральным приемником”, 50-я научная конференция МФТИ, секция твердотельной электроники и радиофизики, ноябрь 2007.

[A10]. **Киселев О.С.**, В.П. Кошелец, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко,

В.Л. Вакс, С.И. Приползин. «Применение сверхпроводникового интегрального приемника для неинвазивной диагностики на основе анализа выдыхаемого воздуха», конференция «Прикладная сверхпроводимость – 2010», 23 марта 2010 г, Москва

[A11]. **O. Kiselev**, M. Birk, A. Ermakov, L. Filippenko, H. Golstein, R. Hoogeveen, N. Kinev, B. van Kuik, A. de Lange, G. de Lange, P. Yagoubov, V. Koshelets. “Balloon-Borne Superconducting Integrated Receiver for Atmospheric Research”. Applied Superconductivity Conference ASC-2010. Washington, USA, August 2010, oral presentation 4EX-02.

[A12]. **О.С. Киселев**, В.П. Кошелец, М.Ю. Торгашин, Л.В. Филиппенко, В.Л. Вакс, С.И. Приползин, «Сверхпроводниковый интегральный приемник для неинвазивной диагностики на основе анализа выдыхаемого воздуха: отработка методики и измерения газовых смесей», 2-я Международная научная конференция «Прикладная сверхпроводимость - 2011», 4 марта 2011 г., Москва.

[A13]. **O. S. Kiselev**, M. Birk, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, L. V. Filippenko, H. Golstein, B. van Kuik, A. de Lange, G. De Lange, A. M. Selig, P. Vogt, G. Wagner, and V. P. Koshelets, “Operating of the superconducting integrated receiver channel of the TELIS atmospheric sounder.”, 22nd International Symposium on Space Terahertz Technology, Tucson, USA, 26-28 April 2011, poster P-23.

[A14]. V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, **O.S. Kiselev**, I.L. Lapitskaya, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R. W.M Hoogeveen, “Integrated Submillimeter Receiver for TELIS”, The Joint International Workshop "Nanosensors and Arrays of Quantum Dots and Josephson Junctions for space applications" combined with the 10th International Workshop "From Andreev Reflection to the Earliest Universe" Björkliden,

Kiruna, Sweden, April 1-9, 2006

- [A15]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, “Integrated Submillimeter Receiver for TELIS”, presented at the Applied Superconductivity Conference ASC-2006. Seattle, USA, August 2006, report 2EY01.
- [A16]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, “Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS”, presented at the 18th International Symposium on Space Terahertz Technology, Pasadena, CA, USA, March 2007, report 10-5.
- [A17]. V. P. Koshelets, A.B. Ermakov, P. N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A. V. Khudchenko, N. V. Kinev, **O. S. Kiselev**, I.L. Lapitskaya, A. S. Sobolev, M. Yu. Torgashin, P. A. Yagoubov, R. W.M. Hoogeveen, G. de Lange, and W. Wild, “Superconducting integrated receivers for radio astronomy and atmospheric monitoring”, 11-th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 2007), Washington D.C., USA, June 2007.
- [A18]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, and W. Wild, “Superconducting Integrated Submm Wave Receiver” submitted to the Frontiers of Josephson Physics and Nanoscience (FJPN07), 7th International AQDJJ conference, Italy, September 2007.
- [A19]. V.P. Koshelets, V.B. Borisov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, N.V. Kinev, A.V. Khudchenko, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.A. Yagoubov, G. de Lange, W. Wild, R.W.M Hoogeveen, “Development of the Superconducting Integrated

Spectrometer for TELIS”, Joint International Workshop "A new generation of ultra-sensitive detectors for dark energy and cosmology experiments", Bjorkliden, Kiruna, Sweden, March 30 -April 6, 2008

[A20]. 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.

[A21]. A.B. Ermakov, **O.S. Kiselev**, V.P. Koshelets, P.A. Yagoubov, G. de Lange, B. van Kuik, “Superconducting Integrated Receiver for TELIS optimization and computer control”, presented at the *19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08)*, Groningen, the Netherlands, April 2008, report P6-5

[A22]. V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Y. Torgashin, G. de Lange, P.A. Yagoubov, R.W.M. Hoogeveen, W. Wild, «Development and Characterization of the Superconducting Integrated Spectrometer for TELIS», Abstract for the Applied Superconductivity Conference ASC-2008. Chicago, USA, August 2008, invited report 3EPE03.

[A23]. Valery Koshelets, Pavel Dmitriev, Andrey Ermakov, Lyudmila Filippenko, Andrey Khudchenko, Nickolay Kinev, **Oleg Kiselev**, Alexander Sobolev, Mikhail Torgashin, “Superconducting integrated submm wave receiver for atmosphere monitoring”, The 10-th Workshop on Submm-Wave Receiver Technologies in Eastern Asia, Wu-Xi, China, November 15-18, 2009.

[A24]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, **O.S. Kiselev**, I.L. Lapitskaya, A.S. Sobolev,

M.Yu. Torgashin, “Superconducting Integrated Terahertz Spectrometer for Atmosphere Monitoring and Radio Astronomy”, Invited talk to the I.F. Schegolev Memorial Conference “Low-Dimensional Metallic and Superconducting Systems”, October 11–16, 2009, Chernogolovka, Russia.

[A25]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, “Superconducting Integrated Receiver”, presented at the International Conference on Superconductive Electronics “EuroFlux-2009: from devices to circuits and systems”, Avignon, France, September 20-23, 2009.

[A26]. V.P. Koshelets, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, L.V. Filippenko, A.V. Khudchenko, N.V. Kinev, **O.S. Kiselev**, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, “On-board Integrated submm spectrometer for atmosphere monitoring and radio astronomy”, ISTC Thematic Workshop “Perspective materials, devices and structures for space applications”, Yerevan, Armenia, May 26 - 28, 2009.

[A27]. Gert de Lange, Pavel Yagoubov, Hans Golstein, Arno de Lange, Bart van Kuik, Joris van Rantwijk Ed de Vries, Johannes Dercksen, Ruud Hoogeveen, Valery Koshelets, **Oleg Kiselev**, Andrey Ermakov “ First Light of the TELIS instrument”, *20th International Symposium on Space Terahertz Technology, Charlottesville, USA*, report T1B, 20-22 April 2009.

[A28]. Кошелец В.П., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Кинев Н.В., **Киселев О.С.**, Лапицкая И.Л., Соколев А.С., Торгашин М.Ю., Филиппенко Л.В., Худченко А.В., «Интегральный сверхпроводниковый спектрометр субмм диапазона волн для атмосферных исследований и радиоастрономии». Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2009.

- [A29]. Valery P. Koshelets, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Nickolay V. Kinev, **Oleg S. Kiselev**, Mikhail Yu Torgashin, Arno de Lange, Gert de Lange, Sergey I Pripolzin, and Vladimir L Vaks, “Superconducting integrated THz receivers: development and applications”, presented at the "Infrared, Millimeter Wave, and Terahertz Technologies" conference is part of Photonics Asia 2010, 18-20 October 2010, Beijing, China.
- [A30]. Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko, Nickolay V. Kinev, Pavel Kudryashov, **Oleg S. Kiselev**, Mikhail Yu. Torgashin, Gert de Lange, Leo de Jong^b, Pavel A Yagoubov, «Superconducting Integrated THz Receiver», presented at the 35th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome , September 2010.
- [A31]. В.Л.Вакс, В.Ю.Балакирев, А.Н.Панин, С.И.Приползин, В.П.Кошелец, **О.С.Киселев**, “Разработка физических принципов построения и реализации спектрометра диапазона 500-700 ГГц с интегральным сверхпроводниковым приемником”, XIV Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, 15-19 марта 2010 г.
- [A32]. Gert de Lange, **Oleg Kiselev**, Pavel Yagoubov, Hans Golstein, Arno de Lange, Bart van Kuik, Joris van Rantwijk, Ed de Vries, Johannes Dercksen, Ruud Hoogeveen, Manfred Birk, Georg Wagner, Andrey Ermakov and Valery Koshelets, “TELIS instrument performance analysis”, *21th International Symposium on Space Terahertz Technology, Oxford, Great Britain, 23-25 March 2010.*
- [A33]. Valery P. Koshelets, Pavel N. Dmitriev, Andrey B. Ermakov, Lyudmila V. Filippenko, Andrey V. Khudchenko¹, Nickolay V. Kinev, Pavel Kudryashov, **Oleg S. Kiselev**, Mikhail Yu. Torgashin, Gert de Lange, Arno de Lange, Leo de Jong, Pavel A Yagoubov, Vladimir L. Vaks, Sergey

I. Pripolzin, “Superconducting Integrated THz Receivers”, *21th International Symposium on Space Terahertz Technology, Oxford, Great Britain, 23-25 March 2010.*

[A34]. Кошелец В.П., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., **Киселев О.С.**, Лапицкая И.Л., Соболев А.С., Торгашин М.Ю., Худченко А.В. “Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона волн для атмосферных исследований”, Всероссийский семинар по радиофизике миллиметровых и субмиллиметровых волн, Нижний Новгород, март 2007.

[A35]. М.Ю. Торгашин, **Киселев О.С.**, Л.В. Филиппенко, В.П. Кошелец, «Интегральный приемник субмм диапазона на основе низкотемпературных сверхпроводников», конференция «Прикладная сверхпроводимость – 2010», 23 марта 2010 г, Москва.

Литература

- [1]. А.В. Соколов, Е.В. Сухонин, Ослабление миллиметровых волн в толще атмосферы, Итоги науки и техники Сер.Радиотехника, т.20, 1980.
- [2]. S. Cherednichenko, M. Kroug, H. Merkel, P. Khosropanah, A Adam, E Kollberg, D Loudkov, G Gol'tsman, B Voronov, H Richter, H Huebers, 1.6 THz heterodyne receiver for the far infrared space telescope, Physica C., v. 372-376, part 1., pp. 427-431.
- [3]. K. Suto and J. Nishizawa, Widely Frequency-Tunable Terahertz Wave Generation and Spectroscopic Application, International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 26 (7), p. 937-952., 2005.
- [4]. P.H. Siegel, THz Applications for Outer and Inner Space, 7th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, p. 1-4., 2006.
- [5]. Проект SMA - Submillimeter Array. – Сайт в сети Интернет – <http://www.cfa.harvard.edu/sma/>, 2011.
- [6]. Проект SOFIA - Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy. – Сайт в сети Интернет – <http://www.sofia.usra.edu/>, 2011.
- [7]. Проект HERSCHEL. – Сайт в сети Интернет – <http://www.esa.int/science/herschel>, 2011.
- [8]. *R.W.M. Hoogeveen, P.A. Yagoubov, Q. Kleipool, V.P. Koshelets, S.V. Shitov, B. Ellison, and M. Birk*; Eds. M. Thumm, W. Wiesbeck, TELIS: a novel three-channel cryogenic heterodyne receiver for stratospheric research, Conference Digest of the 2004 Joint 29th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 12th International Conference on Terahertz Electronics, p. 581-582., 2004.
- [9]. B.M. Fischer, M. Walther, P Uhd Epsen, Far-infrared vibrational modes of DNA components studied by terahertz time-domain spectroscopy, Physics in Medicine and Biology, 47 (21), p. 3807-3814, 2002.
- [10]. K. Humphreys, J. P. Loughran, M. Gradziel, W. Lanigan, T. Ward, J.A. Murphy, C. O'Sullivan, Medical applications of Terahertz Imaging: a Review

of Current Technology and Potential Applications in Biomedical Engineering, Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS., San Francisco, CA, USA, 2004.

- [11]. John F Federici, Brian Schulkin, Feng Huang, Dale Gary, Robert Barat, Filipe Oliveira and David Zimdars, THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs, *Semiconductor. Science and Technology*, v. 20, - S266–S280, 2005.
- [12]. Gerecht, D. Gul, S. Yngvesson, F. Rodriguez-Morales, R. Zannoni, J. Nicholson, Imaging Technology for Security and Biomedical Applications, 13th International Conference on Terahertz Electronics - IRMMW-THz 2005 and The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves. – 2005.
- [13]. P.H. Siegel, Terahertz technology in biology and medicine. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volume: 52, Issue: 10, pp. 2438- 2447, 2004.
- [14]. А.Б. Зорин, Предельная чувствительность СВЧ-смесителей на основе сверхпроводниковых переходов / Зорин А.Б., Лихарев К.К // *Радиотехника и электроника*, вып. 6., с. 1200-1204, 1985.
- [15]. Zorin A.B. Quantum Noise in SIS Mixers / Zorin A.B. // *IEEE Trans Magn.*, v. 21., p. 939-942, 1985.
- [16]. Tucker J.R., Quantum detection at millimeter wavelengths / Tucker J.R., Feldman M.J. // *Rev. Mod. Phys.*, v. 4., pp. 1055-1113, 1985.
- [17]. Stadt van de H. A 1 THz Nb SIS heterodyne mixer with normal metal tuning structure / Stadt van de H., Baryshev A., Dieleman P., Graauw de Th., Klapwijk T.M., Kovtonyuk S., Lange de G., Lapitskaya I., Mees J., Panhuyzen R.A., Prokopenko G., Schaeffer H. // *Proc. 6 Int.Symp. Space Terahertz Technol.*, pp. 66-77, 1995.
- [18]. Jackson B. NbTiN/SiO₂/NbTiN and NbTiN/SiO₂/Al tuning circuits for 1 THz waveguide SIS mixers / Jackson B., Lange de G., Laauwen W.M., Gao J.-

- R., Iosad N.N., Klapwijk T.M. // Proc. 11 Int. Symp. Space Terahertz Technol., U. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, pp. 238-250, 2000.
- [19]. Uzawa Y. Performance of all-NbN quasi-optical SIS mixers for the terahertz band / Uzawa Y., Wang Z., Kawakami A., Miki S. // Proc. 12 Int. Symp. Space Terahertz Technol. - San Diego, USA. - Feb., 2001
- [20]. Karpov A., Blondell J., Voss M., Gundlach K.H., Four photons sensitivity heterodyne detection of submillimeter radiation with superconducting tunnel junctions, *IEEE Trans on Appl. Superconductivity.*, v. 5, No 2., pp. 3304-3307, 1995.
- [21]. J. Zmuidzinas Quasi-optical slot antenna SIS mixers, J. Zmuidzinas, and H. G. LeDuc, *IEEE Trans. on Microwave Theory and Tech.*, v. 40., pp. 1797-1804, 1992.
- [22]. J. Zmuidzinas Low-noise slot antenna SIS mixers, J. Zmuidzinas, N. G. Ugras, D. Miller, M. Gaidis, H. G. LeDuc, J. A. Stern, *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity.*, v. 5, No. 2., p. 3053, 1995.
- [23]. Проект ALMA - Сайт в сети Интернет - <http://www.almaobservatory.org/index.php>. 2011.
- [24]. Prospects for terahertz radio astronomy from northern Chile / R. Blundell, J. W. Barrett, H. Gibson, C. Gottlieb, T. R. Hunter, R. Kimberk, S. Leiker, D. Marrone, D. Meledin, S. Paine, D. C. Papa, R. G. Plante, P. Riddle, M. J. Smith, T. K. Sridharan, C.-Y. E. Tong, R. W. Wilson, M. Diaz, L. Bronfman, J. May, A. Otarola, S. J. E. Radford // Proceedings of the 13th International Symposium on Space Terahertz Technology / Harvard University.— Cambridge, MA, USA: 2002. – p. 159.
- [25]. Проект MIPAS-B – сайт в сети Интернет - <http://www.imk-asf.kit.edu/english/533.php>. 2011
- [26]. Дмитриев П.Н. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВЫХ ТИПОВ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ ТУННельНЫХ ПЕРЕХОДОВ ДЛЯ ПРИЕМНЫХ СВЧ УСТРОЙСТВ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2009 г.

- [27]. Филлипенко Л.В. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИЕМНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ПЕРЕХОДОВ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2009 г.
- [28]. К.К. Likharev Dynamics of Josephson junctions and circuits.// Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- [29]. B.D. Josephson Possible New Effects in Superconductive Tunneling. // Phys. Lett. 1962, V. 1, No 7, P. 251-253.
- [30]. К.К. Лихарев, Б.Т. Ульрих Системы с джозефсоновскими контактами. — М.: Изд-во МГУ, 1978.
- [31]. Соболев А.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ С ВЯЗКИМ ПОТОКОМ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ ВИХРЕЙ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2006 г.
- [32]. V.P. Koshelets, S.V. Shitov, A.V. Shchukin, L.V. Filippenko, J. Mygind, A.V. Ustinov. "Self-Pumping Effects and Radiation Linewidth of Josephson Flux Flow Oscillators" Phys. Rev. B, vol. 56, pp 5572-5577, (1997).
- [33]. 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.
- [34]. Худченко А.В. КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПРИЕМНИКА. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2009 г.
- [35]. Suttiwong N. Development and characterization of the balloon borne instrument TELIS (TErahertz and submillimeter LIMb Sounder): 1.8 THz receiver, PhD thesis, Bremen, 2010.

- [36]. Р.В. Ожегов, О.В. Окунев, Г.Н. Гольцман, Л.В. Филиппенко и В.П. Кошелец, «Флуктуационная чувствительность сверхпроводящего интегрального приемника терагерцового диапазона частот», «Радиотехника и электроника», том 54, № 6, сс. 1-6.
- [37]. К.В. Калашников, А.В. Худченко, А.М. Барышев, В.П. Кошелец, «Гармонический смеситель на туннельном переходе сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник», «Радиотехника и Электроника», т. 56, № 6, стр. 751-759, 2011.
- [38]. 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»*, т. XLVIII, № 10-11, стр. 947-954 2005.
(V. P. Koshelets, P. N. Dmitriev, A. B. Ermakov, L. V. Filippenko, O. V. Koryukin, M.Yu.Torgashin, A. V. Khudchenko, “Integrated Superconducting Spectrometer for Atmosphere Monitoring”, “Radiophysics and Quantum Electronics”, vol. 48, No. 10-11, pp 947-954,2005.)
- [39]. Кошелец В.П., Шитов С.В., Филиппенко Л.В., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Соболев А.С., Торгашин М.Ю, Интегральные сверхпроводниковые приемники субмм волн, *Известия высших учебных заведений “Радиофизика”*, Том .46, №8-9, стр. 687-702, 2003.
- [40]. Gert de Lange, Pavel Yagoubov, Hans Golstein, Leo de Jong, Arno de Lange, Bart van Kuik, Ed de Vries, Johannes Dercksen, Ruud Hoogeveen, Valery Koshelets, Andrey Ermakov, and Lyudmila Filippenko, “Flight configuration of the TELIS instrument”, presented at the *19th International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT-08)*, Groningen, the Netherlands, report 10-2., 2008.
- [41]. V.P. Koshelets Radiation linewidth of flux flow oscillators / V.P. Koshelets, A.B. Ermakov, P.N. Dmitriev, A.S. Sobolev, A.M. Baryshev, P.R. Wesselius, J. Mygind // *Superconductor Science and Technology*. - 2001. - v. 14. - pp. 1040 – 1043

- [42]. V.P. Koshelets Externally Phase-Locked Local Oscillator for Submm Integrated Receivers: Achievements and Limitations / V.P. Koshelets, S.V. Shitov, P.N. Dmitriev, A.B. Ermakov, A.S. Sobolev, M.Yu. Torgashin, P.R. Wesselius, P.A. Yagoubov, C. Mahaini, J. Mygind // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. –June 2003. – v. 13, No 2. – pp. 1035 - 1038
- [43]. Allan, D. Time and Frequency (Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators. U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 1990.
- [44]. Land, D. V., Levick, A. P., & Hand, J. W. The use of the Allan deviation for the measurement of the noise and drift performance of microwave radiometers. *Measurement Science and Technology*, 2007, 18, S. 1917-1928
- [45]. J.W. Kooi, G. Chattopadhyay, M. Thielman, T.G. Phillips, and R. Schieder, "Noise Stability of SIS Receivers", *Int J. IR and MM Waves*, Vol. 21, No. 5, May, 2000.
- [46]. 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
- [47]. P. Yagoubov, G. de Lange, A. de Lange, M. Romanini, R. Hoogeveen, V. Koshelets, G. Wagner, M. Birk, "Integration and performance of the flight configuration SIR on TELIS", presented at the *17th International Symposium on Space Terahertz Technology*, Pasadena, CA, USA, March 2007, report P-7.
- [48]. Oelhaf, H. . SCOUT-O3 Large Balloons Equatorial Field Campaign (Teresina 2008). SCOUT Campaign Newsletter , 10. June 2008. S. 8-10
- [49]. База данных спектральных линий газов, составлена в лаборатории JPL, <http://spec.jpl.nasa.gov/>
- [50]. Ермаков А.Б. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР И

УСТРОЙСТВ НА ИХ ОСНОВЕ Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Москва, 2002 г.

- [51]. В.В.Шмидт «Введение в физику сверхпроводников», МЦНМО, 2000.
- [52]. V. P. Koshelets Self-Pumping Effects and Radiation Linewidth of Josephson Flux Flow Oscillators / V. P. Koshelets, S. V. Shitov, A. V. Shchukin, L. V. Filippenko, J. Mygind, A. V. Ustinov.// Phys. Rev. B. – 1997. – 56. – pp. 5572–5577
- [53]. A.M. Baryshev Superconductor-Insulator-Superconductor THz Mixer Integrated with a Superconducting Flux-Flow Oscillator // Ph.D. – thesis. – 2005. - TU Delft
- [54]. Fiske M.D. Temperature and magnetic field dependence of the Josephson tunnelling current // Rev. Mod. Phys., 1964. V. 36. P. 461-469.
- [55]. Бароне А. Патерно Дж. Эффект Джозефсона. Физика и применения // Пер. с англ. М.: Мир, 1985.
- [56]. К.К.Лихарев, Введение в динамику джозефсоновских переходов // Москва: Наука, 1985
- [57]. Marek Jaworski Analytical description of the flux-flow mode in a long Josephson junction //Phys. Rev. B. – 1999. - v. 60 (10)
- [58]. Marek Jaworski Flux-flow mode in the sine-Gordon system // Physics Letters A. – 244. – 1998. – pp. 97-102
- [59]. Swihart J.C. Field Solution for a Thin-Film Superconducting Transmission Line // J. Appl. Phys., 1961. V. 32. P. 461-469.