

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский педагогический государственный университет»



**Р. В. Ожегов, К. Н. Горшков, О. В. Окунев, Г. Н. Гольцман,
В. П. Кошелец, Л. В. Филиппенко, Н. В. Кинёв**

**Флуктуационная чувствительность и стабильность
приемников с СИС и НЕВ смесителями для
терагерцового тепловидения**

МПГУ

Москва • 2014

УДК 62
ББК 32.841

Рецензенты:

Г. М. Чулкова, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики факультета физики и информационных технологий МПГУ

В. А. Ильин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей и экспериментальной физики факультета физики и информационных технологий МПГУ

О-451 Авторы: Р. В. Ожегов, К. Н. Горшков, О. В. Окунев, Г. Н. Гольцман, В. П. Кошелец, Л. В. Филиппенко, Н. В. Кинёв

Флуктуационная чувствительность и стабильность приемников с СИС и НЕВ смесителями для терагерцового тепловидения / Р. В. Ожегов, К. Н. Горшков, О. В. Окунев, Г. Н. Гольцман, В. П. Кошелец, Л. В. Филиппенко, Н. В. Кинёв. – Москва : МПГУ, 2014. – 104 с. : 46 ил.

ISBN 978-5-4263-0192-4

Монография посвящена актуальной проблеме современной радиофизики: построению радиоизображений в терагерцовом диапазоне частот. Неоспоримые преимущества использования терагерцовой системы построения радиоизображений во многих областях от медицины и систем безопасности до навигации в условиях плохой видимости делает эту работу особенно актуальной. Продемонстрированы супергетеродинные тепловизоры терагерцового диапазона частот двух типов. В первом использован супергетеродинный приемник на основе смесителя на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках. Второй супергетеродинный тепловизор, продемонстрированный в работе, основан на сверхпроводниковом интегральном приемнике.

Монография предназначена для студентов старших курсов, аспирантов и начинающих исследователей, работающих в области сверхпроводниковой наноэлектроники и радиофизики.

УДК 62
ББК 32.841

ISBN 978-5-4263-0192-4

©МПГУ, 2014
©Ожегов Р. В., 2014

Оглавление

Введение	5
1 Принципы построения и работы терагерцовых систем радиовидения	13
1.1 Основные применения систем радиовидения радио- и ИК диапазонов	13
1.2 Активные системы терагерцового радиовидения	22
1.2.1 Импульсная активная система терагерцового радиовидения	23
1.2.2 Активная система терагерцового радиовидения, использующая приемник прямого детектирования	25
1.2.3 Активная система терагерцового радиовидения, использующая супергетеродинный приемник	25
1.3 Пассивные системы терагерцового радиовидения	27
1.3.1 Пассивная система терагерцового радиовидения, основанная на приемнике прямого детектирования	30
1.3.2 Пассивная система терагерцового радиовидения, использующая супергетеродинный приемник	34
2 Смеситель на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках	41
2.1 Методика измерения флуктуационной чувствительности НЕВ-смесителя	41
2.2 Экспериментальные результаты и методы достижения предельных значений флуктуационной чувствительности	45
2.3 Изменение параметров НЕВ-смесителя в зависимости от его положения на гиперполусферической линзе	54
2.4 Получение терагерцовых изображений. Влияние препятствий на качество изображений	58
2.5 Выводы к главе	65
3 Сверхпроводниковый интегральный приемник	67

3.1	Сверхпроводниковый интегральный приемник	67
3.2	Описание методики проведения эксперимента	72
3.3	Флуктуационная чувствительность сверхпроводящего интегрального приемника	75
3.4	Временная стабильность сверхпроводящего интегрального приемника	83
3.5	Получение терагерцовых изображений при помощи сверхпроводникового интегрального приемника	86
3.6	Выводы к главе	88

Заключение		91
-------------------	--	-----------

Введение.

Изучение космоса происходит, главным образом, на основании исследования электромагнитного излучения. Первоначально в основе астрономии лежало визуальное наблюдение астрономических объектов в достаточно узком видимом диапазоне длин волн. Наблюдения в смежных диапазонах длин волн начались лишь в прошлом веке, и к настоящему моменту изучение космических объектов ведется в различных областях электромагнитного спектра от радиоволн до гамма излучения.

Астрономические наблюдения в радиодиапазоне стали проводиться с начала 30-х годов прошлого века, положив начало радиоастрономии. За годы своего развития радиоастрономия обогатила человечество знаниями о природе явлений, происходящих внутри космических объектов и окружающего пространства. По мере развития техники появилась возможность проводить измерения в ранее недоступной субмиллиметровой (субмм) и дальней инфракрасной (дальняя ИК) области спектра (100 ГГц – 10 ТГц), именуемой терагерцевым диапазоном [1, 2]. Терагерцевый диапазон частот занимает промежуточное место между радио- и ИК диапазонами. Сложность работы в этом диапазоне частот связана с так называемой "терагерцевой ямой" (THz gap) [3]: мощность источников излучения падает при приближении к терагерцевому диапазону частот как со стороны радиочастот так и со стороны ИК диапазона (Рисунок 1).

Вместе с тем, процессы, связанные с формированием звезд и галактик, сопровождаются интенсивным ультрафиолетовым излучением, нагревающим окружающую "холодную" среду. Таким образом, области Вселенной, в которых протекают процессы звездообразования, как правило, окружены облаками газов с большей температурой и концентрацией, чем "холодное" межзвездное вещество. Интенсивность и спектральный состав излучения подобных областей звездного неба содержит в себе информацию о процессах, происходящих при образовании новых звезд и галактик. В терагерцевом диапазоне спектр излучения Вселенной включает в себя порядка 40 тысяч отдельных линий, но на сегодняшний день произведено наблюдение только нескольких тысяч из них [5, 6]. В силу того, что в основном исследуемые объекты имеют температуру порядка 30 К, максимум их спектра излучения находится

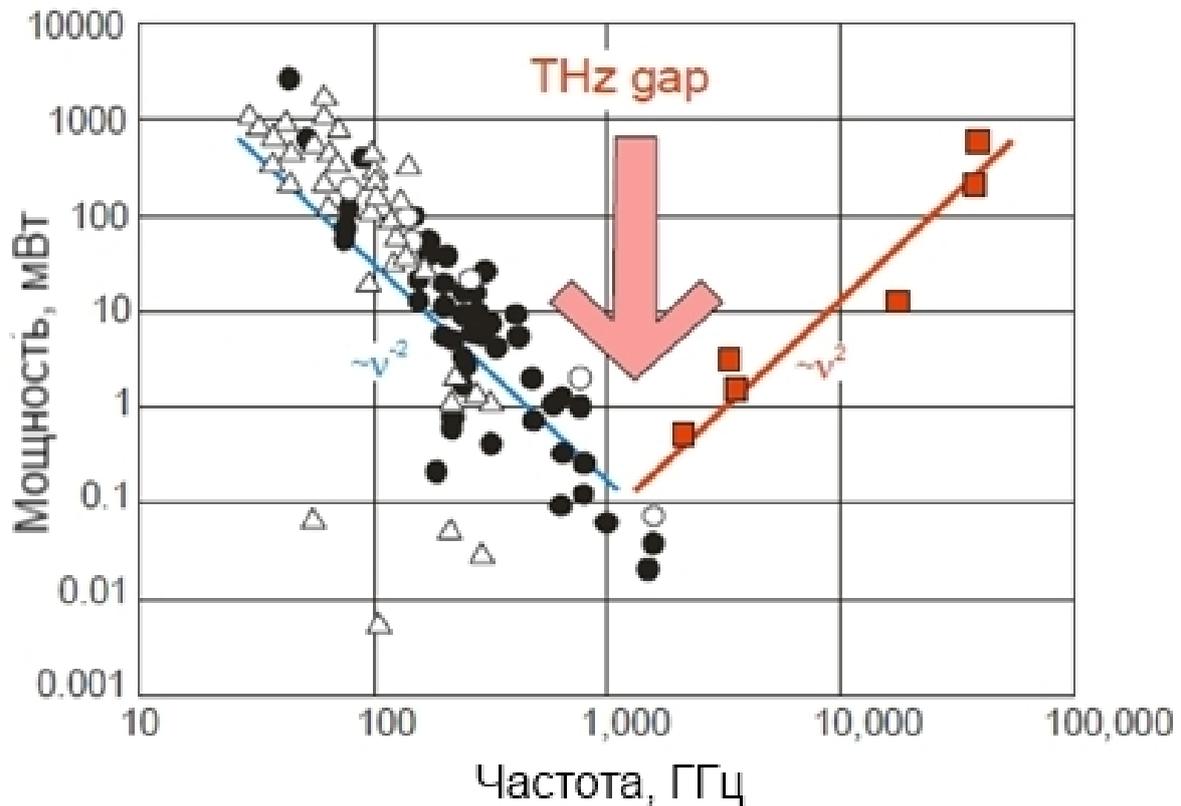


Рис. 1. Зависимость мощности от частоты для различных типов терагерцевых источников [4]. Для квантово-каскадных лазеров (QCL) (заполненный квадрат) мощность излучения существенно падает со снижением частоты, минимально достигнутая частота $f = 1.2$ ТГц при рабочей температуре $T = 110$ К в непрерывном режиме и $T = 163$ К в импульсном режиме. Заполненным кружком показана мощность на выходе умножителей частоты, сопряженных с другими источниками излучения (показаны открытым треугольником): генераторами, основанными на диодах Ганна или лавинно-пролетных диодах. Криогенные источники показаны открытым кружком.

именно в терагерцевом диапазоне частот. По данным, полученным в рамках проекта NASA Cosmic Background Explorer (COBE), излучение, приходящееся на субмиллиметровый и дальний инфракрасный диапазоны, составляет около половины регистрируемой яркости наблюдаемых галактик, включая Млечный путь [7].

Развитие терагерцевых инструментов привело к созданию уникальных астрономических приборов, среди которых особо следует отметить такие находящиеся в разработке и уже состоявшиеся проекты как TELIS - телескоп, базирующийся на стратосферном аэростате [8, 9], HERSHEL - телескоп спутникового базирования [10], SOFIA - телескоп самолетного базирования [11], Миллиметрон - отечественный амбициозный проект, направленный на создание уникального интерферометра со сверхбольшой базой [12], ALMA [13], APEX [14], SMA [15] и т.д. Астрономические исследования в терагерцевом диапазоне частот позволили получить новую информацию о распределении

вещества во вселенной и, в частности, привели к открытию "темной энергии" и "темной материи" [16, 17]. "Научная гонка" в области терагерцевых астрономических исследований способствовала развитию уникальных приемников и источников терагерцевого диапазона частот. В настоящее время существует достаточно большое количество разнообразных терагерцевых приемников и источников излучения, продолжающих развиваться и совершенствоваться, но уже сейчас состояние разработок достигло такого уровня, что такие характеристики как надежность и чувствительность приемников, мощность и стабильность источников излучения, возможность промышленного изготовления, стоимость изготовления позволяют планировать их использование не только в супердорогих астрономических проектах, но и при конструировании приборов, используемых в повседневной жизни человека.

Одной из областей применений, в которой терагерцевые приемники и источники излучения могут занять достойное место, является использование их для получения изображения объектов с помощью радиоволн (системы радиовидения) [18]. Важными потенциальными применениями терагерцевых систем радиовидения [19–22] являются их применение для авиационной безопасности [23–25], навигации в условиях ограниченной видимости, экологическом мониторинге [26, 27], вулканологии [28, 29], выявлении скрытого под одеждой оружия [30–33], медицине [34, 35], астрономии [36, 37], интроскопии промышленных конструкций, пассивной локации произвольных объектов [38] и многие другие.

Существует несколько различных подходов к построению терагерцевой системы радиовидения. Все системы, разрабатываемые в настоящее время, делятся на активные и пассивные. В первом случае объект наблюдения облучается терагерцевым излучением, а регистрирующая аппаратура принимает отраженное от объекта или прошедшее сквозь него излучение. В случае пассивной системы радиовидения регистрируется собственное тепловое излучение объекта наблюдения. Основным плюсом первого метода являются низкие требования по чувствительности к приемнику излучения, однако использование активных методов в ряде случаев нежелательно, например при использовании в медицине и службах безопасности.

Для пассивных систем радиовидения видимое изображение получается по собственному тепловому излучению тел. В этом случае пассивные системы радиовидения вправе называться тепловизорами [39]. При создании пассивной системы радиовидения приходится использовать приемники с высокой чувствительностью. Существующие разработки пассивных терагерцевых систем радиовидения (тепловизоров) делают в основном упор на приемники прямого детектирования. Применение супергетеродинного приемника позволяет использовать спектральную информацию о тепловом излучении наблюдаемых объектов, что в свою очередь позволяет определять химический со-

став наблюдаемых объектов, а значит имеет большой практический интерес с точки зрения применения терагерцевого тепловизора в медицинских системах и службах безопасности.

Помимо этого, супергетеродинный приемник позволяет получать информацию о распределении фазы в фокальной плоскости объекта, а значит, при помощи такого прибора возможно без использования сложной оптики строить срезы, расположенные на различной глубине наблюдаемого объекта только благодаря математической обработке амплитудных и фазовых распределений сигнала в плоскости приемника [40].

Настоящая монография описывает разработку физических принципов построения пассивных тепловизоров терагерцевого диапазона частот, основанных на супергетеродинных приемниках. Среди наиболее развитых смесителей терагерцевого диапазона частот можно выделить смесители на диодах с барьером Шоттки (ДБШ), смесители на квазичастичной нелинейности туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС смеситель) и смесители на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках (НЕВ смеситель от английской аббревиатуры hot-electron bolometer).

До недавнего времени в терагерцевом диапазоне в качестве приемного элемента использовались только ДБШ, работающие в широком диапазоне температур [41–43]. Тем самым они становились удобным вариантом приемника, несмотря на резкое ухудшение чувствительности с ростом частоты гетеродина. Однако, большим недостатком смесителей на диоде с барьером Шоттки является большая требуемая мощность гетеродина (порядка милливатта), что предполагает использование громоздких, с большим энергопотреблением газовых лазеров, в то время как в практических гетеродинных приемниках обычно используют компактные твердотельные гетеродинные источники (например, диод Ганна с умножителями или полупроводниковые лазеры) с выходной мощностью всего несколько микроватт.

Значительный прогресс был достигнут с разработкой маломощных смесителей, использующих туннельный переход сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник [44]. Он состоит из двух сверхпроводников, разделенных ультратонким слоем диэлектрика. Данный тип гетеродинного приемника сочетает предельно низкую шумовую температуру, близкую к квантовому пределу, с широкой полосой промежуточных частот, требует малой мощности гетеродина и отличается высокой стабильностью к ее флуктуациям в процессе измерений. Однако шумовая температура СИС смесителя испытывает значительный рост, когда частота излучения превышает удвоенную величину энергетической щели сверхпроводящего материала, из которого он изготовлен (порядка 0.7 ТГц для ниобия).

Смеситель на эффекте разогрева электронов в резистивном состоянии

сверхпроводников [45] обладает хорошей чувствительностью наряду с достаточно широкой полосой преобразования, а также требует малой мощности гетеродина при субмикронных размерах чувствительного элемента. Он является весьма перспективным приемным элементом для терагерцевого диапазона частот, так как не имеет частотных ограничений по механизму смешения и не содержит реактивной компоненты, что облегчает задачу согласования смесителя с различными типами квазиоптических антенн. В работе [46] продемонстрирована работа НЕВ смесителя на частотах до 70 ТГц. Стоит однако отметить, что с уменьшением рабочей частоты ниже энергетической щели сверхпроводящего материала наблюдается ухудшение шумовой температуры приемника.

В качестве гетеродина наиболее приспособленным для использования в интегральных схемах является генератор на вязком течении джозефсоновских вихрей (в англоязычной терминологии flux flow oscillator – FFO) [47–50]. FFO обладает узкой линией генерации и допускает использование схем фазовой автоподстройки частоты. Мощность современных FFO достаточна для накачки НЕВ и СИС смесителей.

В настоящее время не существует аналогов пассивных терагерцевых супергетеродинных тепловизоров. Разработка физических основ работы такого устройства является важной задачей, актуальность которой определяется широкими возможностями применения и востребованностью систем радиовидения терагерцевого диапазона в таких важных областях как медицина, интроскопия промышленных конструкций, воздушная и морская навигация в условиях плохой видимости, пожарная охрана, службы экологического мониторинга и системы безопасности. Последнее применение особенно актуально в контексте усиливающейся угрозы миру со стороны мирового терроризма. Актуальность настоящей работы связана с необходимостью детального исследования чувствительных приемников терагерцевого диапазона частот применительно к построению систем радиовидения. Основными интересующими параметрами супергетеродинного приемника с точки зрения использования его в тепловизионном приемнике являются флуктуационная чувствительность и временная стабильность приемника. Ранее для НЕВ смесителя и СИП не проводились исследования флуктуационной чувствительности, в связи с этим разработка методов достижения предельной флуктуационной чувствительности приемников является актуальной задачей. Временная стабильность для таких приемников рассматривалась ранее только как временная стабильность спектрометра. Повышение временной стабильности при работе в широкой полосе ПЧ для супергетеродинного приемника является важной задачей, решение которой необходимо для обеспечения высокой чувствительности приемника за время получения кадра системы построения радиоизображений.

Данная работа описывает исследование флуктуационной чувствительно-

сти и методов достижения предельных значений флуктуационной чувствительности СИС и НЕВ смесителей, причем СИС смеситель рассматривается совместно с сверхпроводящим интегральным приемником. Также работа посвящена исследованию временной стабильности смесителей и разработке методов достижения высокой временной стабильности приемников.

Результаты, описанные в работе, важны с практической точки зрения. Они могут быть применены для создания коммерческих тепловизионных систем терагерцевого диапазона частот. В настоящее время компания ЗАО "Сверхпроводниковые нанотехнологии", созданная сотрудниками и аспирантами УНРЦ МПГУ, основываясь на результатах диссертационного исследования, проводит разработку прототипа пассивного терагерцевого тепловизора на основе сверхпроводящего интегрального приемника.

Приемники и источники терагерцевого диапазона частот активно развиваются в настоящее время многими научными группами. Наиболее важной характеристикой терагерцевых приемников в тепловизионных задачах является флуктуационная чувствительность приемника. С точки зрения достижения предельных флуктуационных чувствительностей сверхпроводящий интегральный приемник и НЕВ смеситель ранее не исследовались. Научная новизна работы заключается в исследовании узлов пассивной супергетеродинной тепловизионной схемы терагерцевого диапазона частот, а также в детальном исследовании флуктуационной чувствительности СИС и НЕВ смесителей, изучении влияния паразитных вкладов и достижении предельных значений флуктуационной чувствительности приемников. Помимо этого, новизна работы связана с использованием цифровых методов обработки сигнала в реальном времени для увеличения временной стабильности супергетеродинных приемников.

Монография состоит из 3-х глав и защищаемые положения, а также приводится краткое содержание диссертации.

В первой главе **"Принципы построения и работы терагерцевых систем радиовидения"** дается обзор возможных применений терагерцевых систем построения радиоизображений, а также рассматриваются основные существующие схемные решения систем радиовидения.

Во второй главе **"Смеситель на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках"** изложены результаты исследования лабораторного макета терагерцевого супергетеродинного тепловизора, основанного на НЕВ смесителе в качестве приемного элемента. Приводятся основные характеристики подобного устройства и предлагаются методики, предназначенные для достижения предельных флуктуационных характеристик. Представлен ряд терагерцевых изображений, полученных с применением такого приемника. Обсуждаются необходимые условия получения тепловых изображений за препятствиями. Показано влияние расположения НЕВ

смесителя на гиперполусферической линзе на характеристики приемника.

В третьей главе **”Сверхпроводниковый интегральный приемник”** изложены результаты исследования лабораторного макета терагерцевого супергетеродинного тепловизора, изготовленного на базе сверхпроводящего интегрального приемника, в котором объединены СИС смеситель и генератор гетеродина FFO. Изучены его основные флуктуационные характеристики, а также получены тепловые изображения в терагерцевом диапазоне частот. Описана методика увеличения временной стабильности приемника на базе сверхпроводящего интегрального приемника.

Используемые сокращения и обозначения

В тексте работы и на рисунках используются следующие сокращения и обозначения:

- НЕВ – hot-electron bolometer (болометрический приемник на эффекте электронного разогрева в сверхпроводящих пленках);
- СИС – туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник;
- СИП – сверхпроводящий интегральный приемник;
- FFO – flux flow oscillator (генератор на вязком течении джозефсоновских вихрей);
- ДБШ – диоды с барьером Шоттки;
- ПЧ – промежуточная частота;
- СВЧ – сверх-высокочастотный диапазон длин волн;
- ИК – инфракрасный диапазон длин волн;
- ФАПЧ – фазовая автоподстройка частоты;
- АЧТ – абсолютно черное тело;
- ΔT_H или NETD – флуктуационная чувствительность супергетеродинного приемника (в англоязычной терминологии noise equivalent temperature difference, дословный перевод эквивалентная шуму разность температур);
- ΔT_D – флуктуационная чувствительность приемника прямого детектирования;

- NEP – эквивалентная мощность шума (в англоязычной терминологии noise equivalent power);
- B_D – входная полоса приемника прямого детектирования;
- F_0 – центральная частота приемной антенны;
- B_H – ширина полосы промежуточных частот супергетеродинного приемника;
- τ – постоянная времени интегрирования;
- q – радиометрический выигрыш, величина равная $\sqrt{B_H \tau}$;
- T_R – шумовая температура супергетеродинного приемника;
- T_S – радиояркостная температура наблюдаемого объекта;
- k_B – постоянная Больцмана;
- Δ – энергетическая щель сверхпроводника;
- h – постоянная Планка.

Глава 1

Принципы построения и работы терагерцевых систем радиовидения

В настоящее время существует большое количество разнообразных систем радиовидения, как СВЧ, так и ИК диапазонов [51]. Они обладают хорошими характеристиками и широко востребованы. Однако, при всем существующем многообразии, они выглядят менее привлекательными при сравнении их с возможностями приборов терагерцевого диапазона частот. Основная причина, почему до настоящего времени не произошло вытеснение терагерцевыми камерами систем, использующих иные частотные диапазоны, заключается в том, что приемники и генераторы терагерцевого излучения в настоящее время находятся на стадии научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок. В данной главе рассматриваются основные области применения систем радиовидения, а также основные схематические решения систем приема и обработки информации, используемых при построении систем построения изображений терагерцевого диапазона частот.

1.1 Основные применения систем радиовидения радио– и ИК диапазонов

Важными потенциальными применениями терагерцевых систем радиовидения [19–22] являются их применения в системах авиационной безопасности [23–25], навигации в условиях ограниченной видимости, экологическом мониторинге [26, 27], вулканологии [28, 29], выявлении скрытого под одеждой оружия [30–33], медицине [34, 35], астрономии [36, 37], интроскопии промышленных конструкций, пассивной локации произвольных объектов [38] и мно-

гие другие.

На сегодняшний момент имеется ряд различных систем как уже используемых, так и только разрабатываемых, использующие такие типы отображения, как рентген, микроволновая голография, акустическое детектирование и т.д. Основным минусом большинства существующих систем безопасности является невозможность дистанционного зондирования объектов. Так например, для обнаружения металлических объектов с помощью детектора металлических объектов необходимо, чтобы объект прошел сквозь раму металлодетектора или, в случае ручного металлодетектора, был помещен в непосредственной близости от приемного элемента приемника. В случае, когда речь идет о злоумышленнике, следует понимать, что он будет всячески избегать прохождения через металлодетектор. Для обнаружения неметаллических объектов, таких как керамическое и пластиковое оружие, взрывчатые вещества, наркотические препараты металлодетекторы вообще не применимы. Альтернативой металлодетекторам, основанным на магнитных принципах, могут служить рентгеновские системы досмотра багажа в аэропортах. В этом случае провозимый запрещенный груз крайне сложно спрятать, его форма будет четко видна на экране системы построения изображений, однако к минусам рентгеновской системы безопасности следует отнести невозможность ее использования для досмотра людей, так как рентгеновское излучение может причинить вред здоровью человека. Другим недостатком такой системы является крайняя затрудненность определения химического состава вещества, из которого изготовлен наблюдаемый объект. Последнее очень важно для обнаружения взрывчатых и наркотических веществ, перевозимых в багаже, которым может быть придана вполне безобидная форма.

Суммируя все выше сказанное, можно сформулировать основные требования к системам безопасности. Конечно, в зависимости от того или иного направления использования системы некоторые требования будут более важными по сравнению с другими. Итак, основные требования, предъявляемые к системам безопасности:

- возможность дистанционного получения изображений;
- использование для построения системы радиовидения пассивных принципов (это требование особенно важно в системах где, во-первых, наблюдатель не должен быть обнаружен, а во-вторых, наблюдение ведется за людьми и использование активных систем может нанести вред их здоровью);
- возможность обнаружения скрытых под одеждой и в багаже объектов;
- возможность распознавания материала, из которого изготовлен наблюдаемый объект.

Сформулированные требования частично удовлетворены большей частью существующих систем безопасности, однако полностью эти требования могут быть выполнены лишь в пассивных системах радиовидения миллиметрового/терагерцевого диапазона частот. Несмотря на то, что системы построения радиоизображений радиодиапазона, терагерцевого диапазона частот и ИК диапазона используют в своей работе общие принципы, системы терагерцевого диапазона частот обладают ощутимыми преимуществами по сравнению со своими конкурентами. Так, большинство материалов, используемых в повседневной жизни, являются непрозрачными для излучения ИК диапазона, в то время как излучение радиодиапазона способно свободно проникать сквозь такие препятствия как одежда, багаж и даже стены зданий. С другой стороны пространственное изображение, а значит и качество изображения, получаемого системой радиовидения напрямую связано с длиной волны излучения, используемого в приборе. По этому параметру системы построения изображений радиодиапазона существенно уступают системам ИК радиовидения. Занимая пограничное положение между радио- и ИК диапазонами, терагерцевое излучение обладает высокой проникающей способностью, сохраняя при этом высокое пространственное разрешение, что делает их наиболее привлекательными при проектировании систем безопасности. Возможности терагерцевого излучения по обнаружению скрытых объектов представлены на рисунке 1.1 [52].

Помимо этого, имея сведения о спектральных характеристиках наблюдаемого объекта можно определить химический состав вещества, из которого он изготовлен. Особенно это необходимо для обнаружения потенциально опасных веществ таких как взрывчатые и наркотические вещества. Спектральные характеристики пропускания некоторых веществ в терагерцевом диапазоне частот представлены на рисунке 1.2.

Хороший пример, демонстрирующий возможности терагерцевых систем радиовидения по определению химического состава наблюдаемого вещества продемонстрирован в работе [55]. На рисунке 1.3 приведены спектральные характеристики, а также терагерцевые изображения трех веществ, полученные механическим сканированием, два из которых являются наркотическими (MDMA и метамфетамин), а третий – лекарственным (аспирин). На изображениях, полученных в терагерцевом диапазоне частот невозможно определить тип наблюдаемого вещества.

Для определения химического состава вещества объекта используется следующая формула:

$$[P] = [S]^{-1}[I], \quad (1.1)$$

здесь $[P]$ – матрица размерностью $M \times N$, определяющая вероятность нахождения i -го вещества (всего N веществ) в данной точке изображения (всего в изображении M точек). $[I]$ – матрица размерностью $M \times K$, определяющая

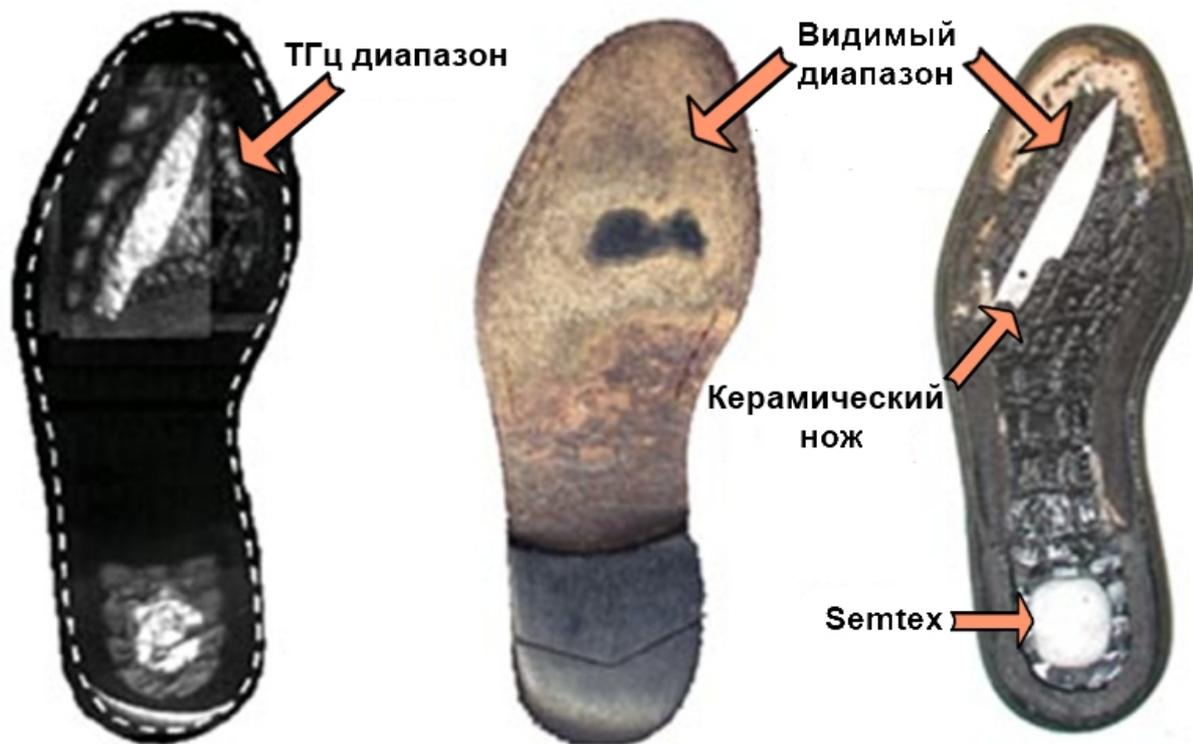


Рис. 1.1. Изображение керамического ножа и взрывчатого вещества Semtex, спрятанных в подошве обуви. Слева представлено терагерцовое изображение ботинка, справа и в центре – изображение в видимом диапазоне частот. Изображение справа сделано с удаленной подошвой [52].

интенсивность полученного изображения в данной точке на данной частоте (всего K частот), $[S]$ – матрица размерностью $N \times K$, определяющая спектральные характеристики каждого из N веществ на каждой из K частот. Измеряемыми величинами в этом примере являются матрицы $[I]$ и $[S]$. Благодаря данному методу можно точно определить положение объектов, выполненных из интересующих веществ, что и продемонстрировано рисунком 1.3.

Более того, можно воспользоваться псевдоцветным терагерцевым изображением. По аналогии с человеческим зрением представим, что изображение полученное на наименьшей частоте соответствует красной компоненте цветного изображения, изображение полученное на наибольшей частоте – синей, а центральная частота соответствует зеленой компоненте цветного изображения. Используя стандартную RGB-палитру [56], используемую в цифровой технике для представления цветного изображения, можно получить псевдоцветное терагерцевое изображение, также представленное на рисунке 1.3. В этом изображении цвет объекта определяет химический состав вещества, из которого он изготовлен, а значит такой подход может быть использован в качестве экспресс анализа химического состава вещества и поиска потенциально опасных веществ.

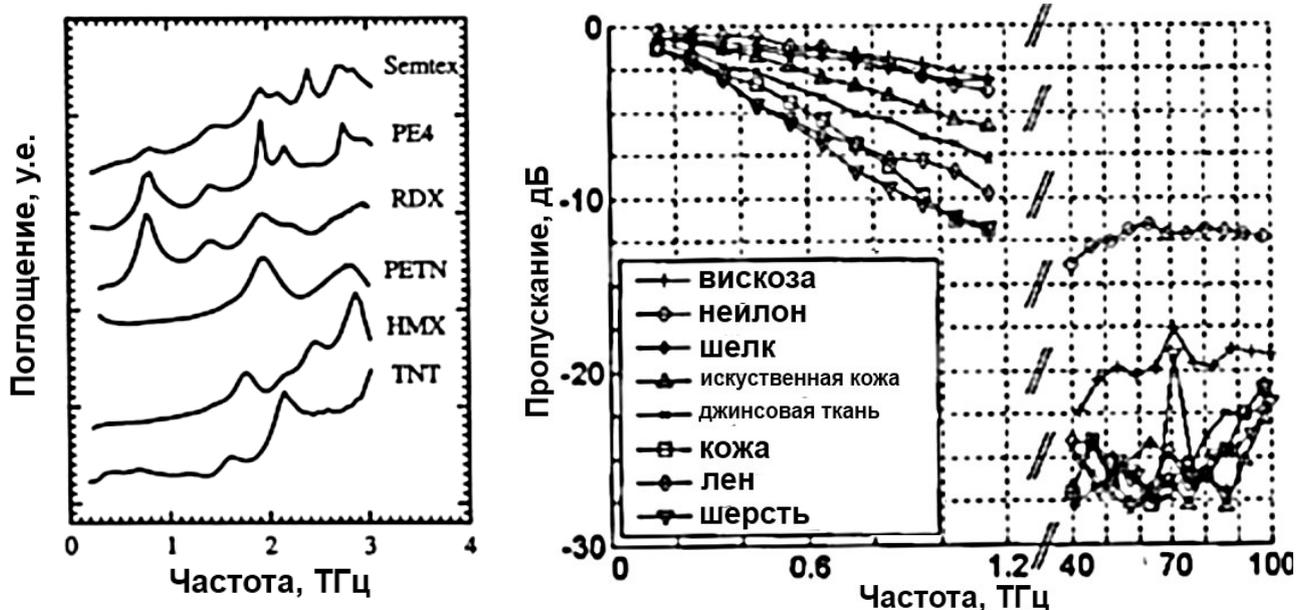


Рис. 1.2. Характеристики пропускания некоторых веществ. Слева представлены характеристики пропускания некоторых взрывчатых веществ, для наглядности характеристики пропускания приведены с вертикальным сдвигом [53]. Справа приведены характеристики пропускания материалов, применяемых при изготовлении одежды [54].

Приведенный пример демонстрирует возможности терагерцевых систем радиовидения к анализу химического состава наблюдаемого объекта. Подобный анализ возможен в активных системах. Такие же возможности предлагают и пассивные супергетеродинные системы построения изображений. В пассивных системах радиовидения, использующих в качестве чувствительного элемента приемники прямого детектирования частотная избирательность определяется входной полосой антенны приемника и увеличение избирательности приемника приводит к существенному ухудшению чувствительности приемника. Получение спектра приемниками прямого детектирования также возможно при помощи сложных интерферометрических схем. Подробнее о существующих системах радиовидения терагерцевого диапазона частот будет рассказано в последующих параграфах.

В медицине в настоящее время широко используются системы построения изображений как рентгеновские, ИК, так и акустические (ультразвуковые). Однако системам терагерцевого диапазона частот уделяется недостаточное внимание, хотя они в некоторых областях применения потенциально способны давать лучший результат по сравнению с существующими медицинскими системами без причинения вреда здоровью человека. Одним из таких применений служит обнаружение онкологических заболеваний на ранних стадиях их возникновения. На рисунке 1.4 представлены примеры медицинского применения терагерцевых систем построения изображений [52].

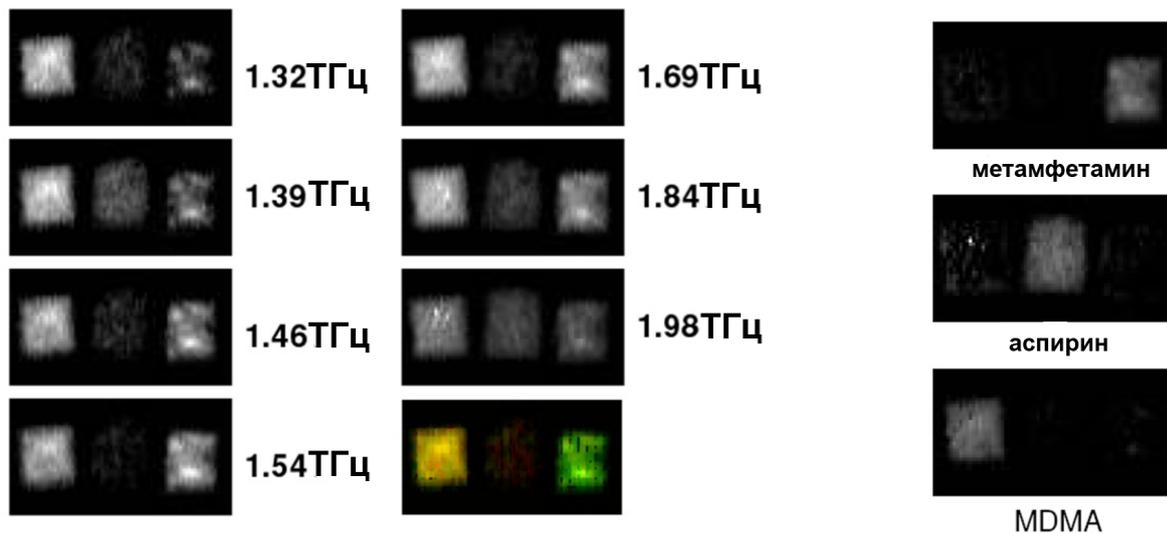
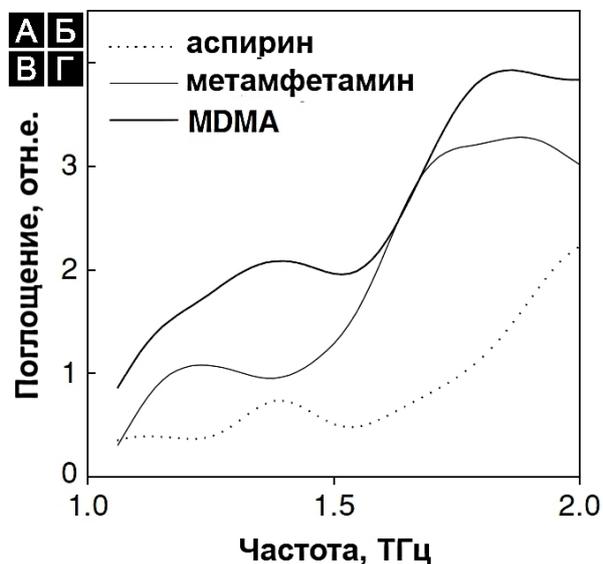


Рис. 1.3. Демонстрация возможностей терагерцевых систем построения изображений по определению химического состава наблюдаемых объектов. А: спектральные характеристики пропускания наркотических веществ (MDMA, метамфетамин) и аспирина. Б: объекты наблюдения слева направо MDMA, аспирин, метамфетамин. В: терагерцевые изображения объектов, полученные на различных частотах. Цветное изображение демонстрирует возможность распознавания объектов при помощи "цветного" терагерцевого изображения. Г: результаты использования формулы (1.1) [55].



Рис. 1.4. Использование терагерцовых систем построения изображений в медицинских целях. Сверху представлен пример обнаружения злокачественной опухоли на ранней стадии развития. При этом красным цветом представлены раковые клетки. На изображении снизу представлено обнаружение полостей при диагностике целостности зубов, выполненное в терагерцовом диапазоне частот [52].

Хорошим примером, демонстрирующим преимущества терагерцовых систем перед используемыми в настоящее время системами, служит то, что построение томограммы мозга современными томографами осуществляется по распределению температуры на черепе человека, поскольку для ИК излучения череп не прозрачен. Для успешного использования этого метода необходимо удаление волосяного покрова с головы пациента, к тому же стоит учесть, что существующие аномалии в мозгу человека могут привести к неоднозначной трактовке распределения температуры на поверхности черепа.

Другой обычно применяемый метод построения томограммы мозга человека (магнитно-резонансная томография [57]) вообще является потенциально опасным для здоровья человека, поскольку важным условием работы этого метода является облучение человека электромагнитным излучением в сочетании с сильными магнитными полями.

Еще одним возможным применением источников и приемников терагерцового диапазона частот является использование их во всепогодных системах навигации. Важным преимуществом радиовидения над ИК системами является всепогодность, т.е. способность получать изображения объектов в любых погодных условиях, в любое время суток. Дождь, снег или туман ведут лишь к небольшому изменению контраста изображения в системах радиовидения и являются серьезной преградой для работы ИК приборов. На рисунке

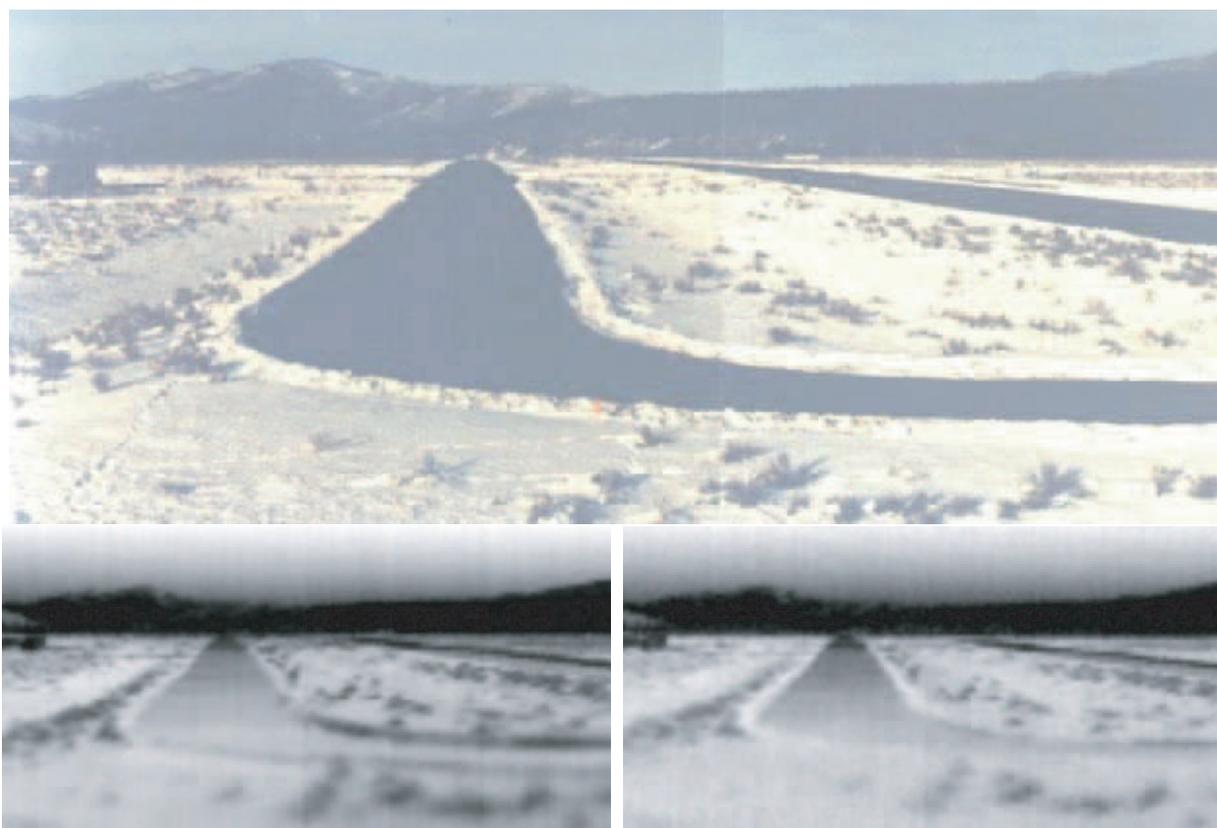


Рис. 1.5. Радиочастотное изображение ландшафта в ночных и дневных условиях. Сверху представлено изображение в видимом диапазоне частот. Слева внизу представлено изображение ландшафта на частоте 94 ГГц в дневное время, справа внизу – в ночное время. Особо следует отметить то, что радиоизображения малоотличимы друг от друга.

1.5 приведен пример изображения, полученного с помощью 94 ГГц системы пассивного радиовидения днем и ночью, при этом различия дневного и ночного кадров малозаметны [21]. Помимо этого важен также тот факт, что радиояркостьная температура неба в этом диапазоне практически не зависит от времени суток (см. рисунок 1.6 [20]), а значит контраст получаемого изображения будет одинаков и в дневное и в ночное время.

Приведенные выше примеры не описывают целиком все возможные применения терагерцовых приемных систем. Однако, преимущества терагерцовых методов по сравнению с традиционными в приведенных примерах демонстрируют необходимость проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, направленных на построение терагерцовых систем радиовидения.

В настоящее время существует несколько различных подходов к построению терагерцовых систем радиовидения. Основные подходы к решению этой задачи представлены в виде схемы на рисунке 1.7. В последующих параграфах детально рассматриваются физические основы работы и основные особенности каждого из приведенных на рисунке подходов.

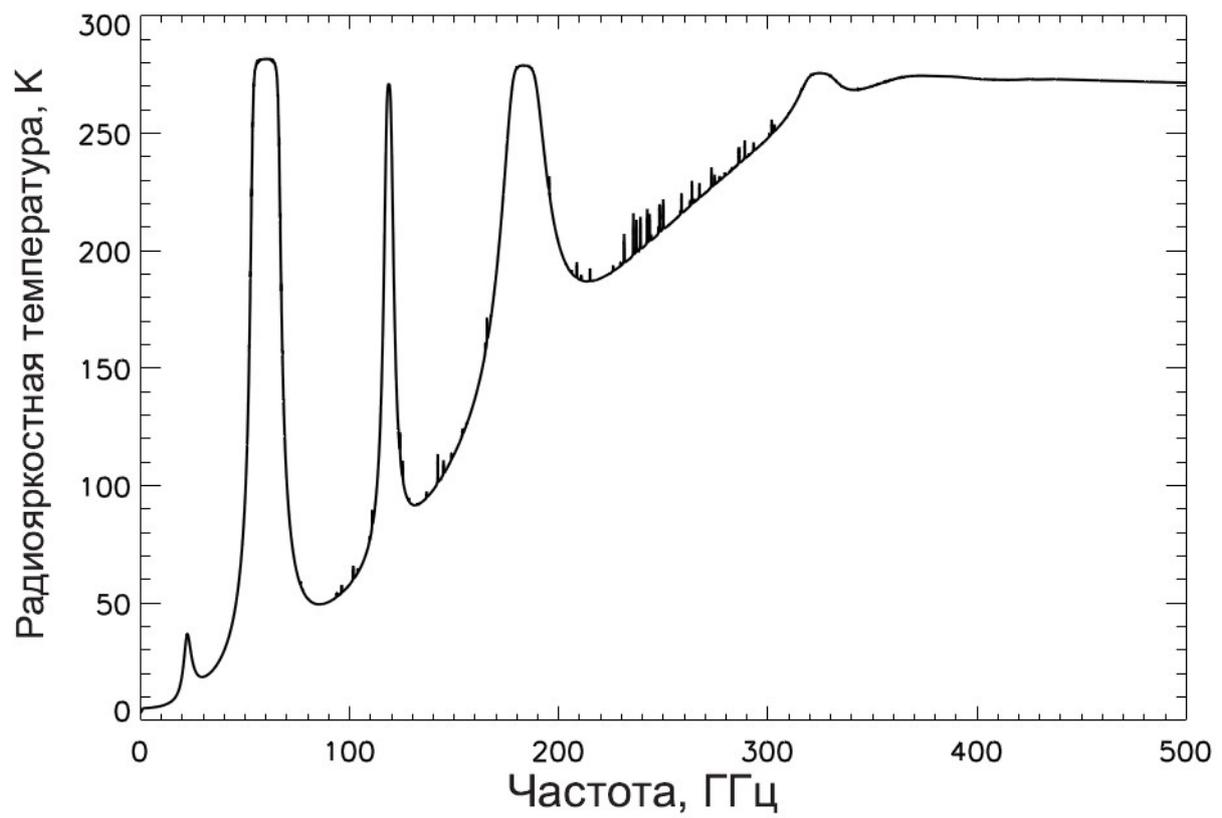


Рис. 1.6. Радиояркость температура неба в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых длин волн [20].

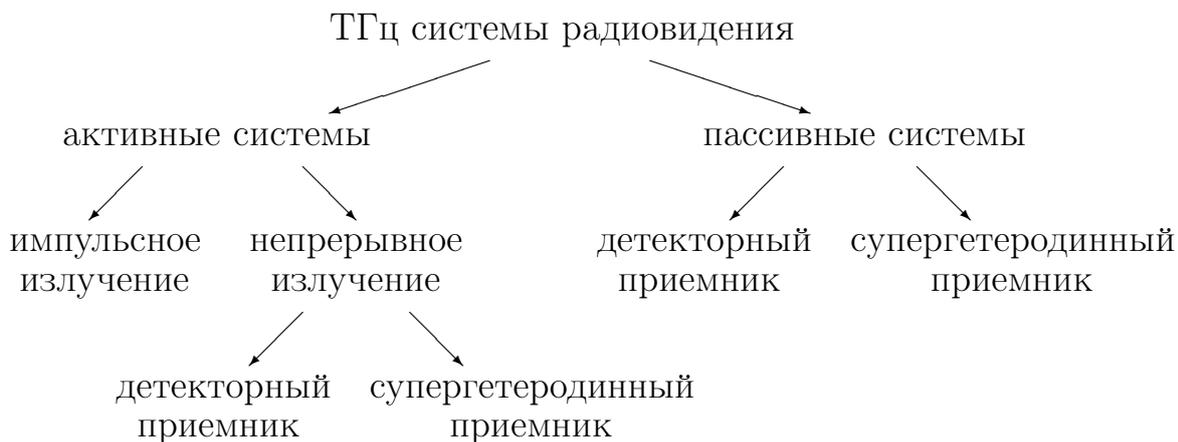


Рис. 1.7. Существующие подходы к построению терагерцевых систем радиовидения.

1.2 Активные системы терагерцевого радиовидения

Одним из основных узлов активной системы радиовидения является источник излучения, с помощью которого объект наблюдения подвергается облучению. При этом сигнал приемника зависит от коэффициентов пропускания, отражения, а также величины поглощения и рассеяния в наблюдаемом объекте. Принято использовать два различных подхода к получению изображений активными методами. В первом случае приемник принимает прошедшее сквозь объект излучение, при таком подходе контраст изображения определяется коэффициентом пропускания разных частей объекта. В другом случае принимается отраженное от объекта излучение и изображение определяется распределением коэффициента отражения наблюдаемого объекта.

Основной плюс работы с активными системами радиовидения заключается в низких требованиях к чувствительности приемника. Благодаря этому имеется возможность использовать приемники, работающие при комнатных температурах, такие как диоды с барьером Шоттки или ММИС-структуры (Monolithic Microwave Integrated Circuit) [58]. Имея источник с изменяемой частотой излучения, также можно проводить спектральные исследования объектов наблюдения, а, следовательно, получать дополнительную информацию об объекте наблюдения.

Основными же минусами подобных систем являются высокие требования к оптической схеме такого приемника, позволяющей предотвратить появление бликов, связанных с переотражениями от объекта, стен помещения и предметов, окружающих объект. В ряде случаев, использование активных систем крайне нежелательно (прежде всего речь идет о случаях, когда объектом наблюдения является человек).

1.2.1 Импульсная активная система терагерцового радиовидения

Импульсные активные системы терагерцового радиовидения к настоящему времени уже получили достаточно большое развитие. Примеры подобных систем описаны в работах [59–63]. Стоит также упомянуть, что к настоящему времени существуют уже коммерческие модели терагерцовых импульсных систем, позволяющие получать спектральные характеристики исследуемых образцов, например системы TPS spektra 1000, TPITM imaga 2000 компании Teraview [52, 64].

В качестве источника излучения в таких системах служит импульсный терагерцевый источник. Одним из способов получения терагерцевого импульса является облучение фемтосекундным импульсом GaAs структуры с выполненной на ней металлической антенной [60]. Короткий фемтосекундный импульс обладает чрезвычайно широким спектром, перекрывающим терагерцовый диапазон частот. При этом спектр сигнала, переизлученного GaAs структурой определяется только характеристиками антенны. Изменяя топологию антенны, можно формировать спектр импульса. Приниматься такой терагерцевый импульс может точно такой же структурой (GaAs с выполненной на нем терагерцовой металлической антенной). Однако, при всей простоте получения терагерцевого импульса остается крайне сложным получение узких линий излучения такой структуры. Для получения спектральных зависимостей отражения и пропускания необходимо использовать интерферометрические методы, существенно усложняющие конструкцию прибора.

В настоящее время разрабатываются различные подходы получения терагерцовых изображений при помощи таких систем, работающих как с прошедшим сквозь объект излучением, так и с отраженным от него излучением. На рисунке 1.8 представлена типичная схема используемая в импульсных активных системах построения терагерцовых изображений [65]. На рисунке представлено 3 отдельных блока: блок генерации импульса терагерцевого излучения, блок детектирования и система согласования терагерцевого излучения с исследуемым образцом. При этом сам образец может перемещаться, что позволяет производить получение изображения объекта его сканированием. В приведенном примере исследуется прошедшее сквозь образец излучение.

Существуют и другие варианты построения активной импульсной системы построения изображений. Например, можно использовать в качестве сигнала отраженное от наблюдаемого объекта излучение. При этом, если объект имеет слоистую структуру и состоит из материалов различных по своим электродинамическим свойствам, то на каждой границе будет происходить частичное отражение сигнала. Вводя дополнительную задержку в тракт сигнала опорного импульса, можно добиться получения изображений от слоев

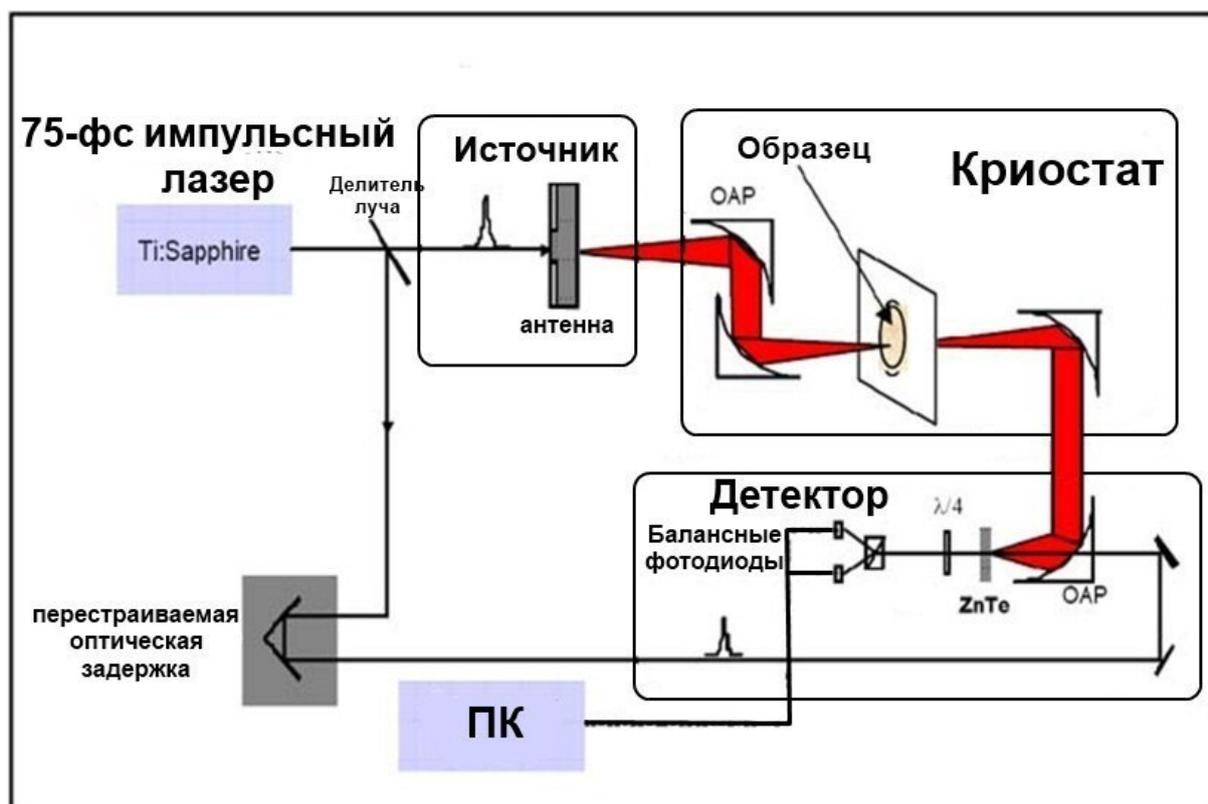


Рис. 1.8. Блок-схема импульсной активной системы радиовидения [65]. В качестве источника излучения используется металлическая антенна, выполненная на полупроводниковой структуре, подвергаемая облучению коротким фемтосекундным импульсом лазера накачки.

расположенных внутри объекта. Результат работы подобной системы приведен на рисунке 1.9 [59].

1.2.2 Активная система терагерцевого радиовидения, использующая приемник прямого детектирования

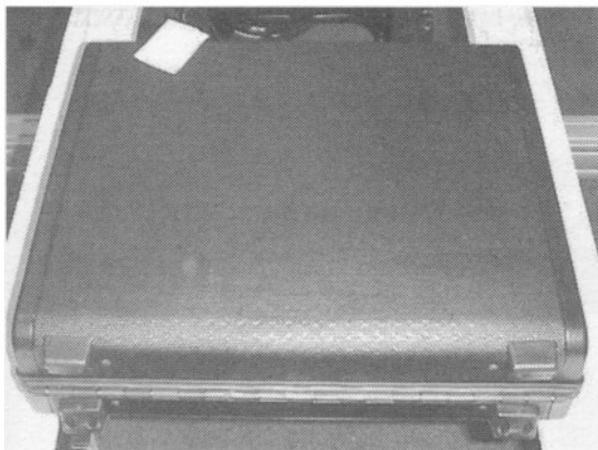
Представленные на рисунке 1.7 типы активных систем терагерцевого радиовидения разделены по типу используемого источника излучения. Существенным отличием описываемых в данном параграфе терагерцевых систем радиовидения от рассмотренных ранее импульсных активных систем является использование источников непрерывного излучения терагерцевых волн. В качестве примера такой системы на рисунке 1.10 приведена блок-схема активной системы терагерцевого радиовидения [55]. В качестве прямого детектора в этой работе был использован пиродетектор, не обладающий рекордными чувствительностью и шумовыми характеристиками среди детекторов терагерцевого диапазона частот. В качестве перестраиваемого источника излучения служил параметрический генератор терагерцевых волн. Результат работы такой системы был представлен ранее на рисунке 1.3 при обсуждении возможностей определения химического состава наблюдаемого объекта.

В работе [66] проведено качественное сравнение систем построения изображений, использующих импульсные источники, с системами использующими непрерывный источник излучения. Последние являются более выгодными системами как по своей стоимости, скорости работы, так и по своим характеристикам (контрастности получаемых изображений). Проигрывают же они только по информативности: данный метод несет информацию лишь об коэффициенте отражения или поглощения в веществе, при этом невозможно строить срезы наблюдаемого объекта.

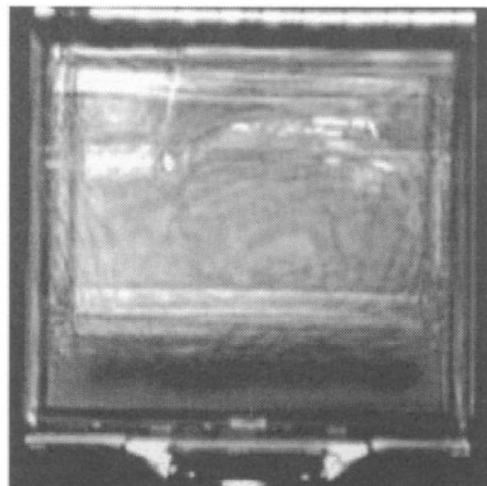
1.2.3 Активная система терагерцевого радиовидения, использующая супергетеродинный приемник

В случаях, когда активная система построения радиоизображений используется в условиях большого рассеяния или поглощения сигнала (например, при работе в открытом пространстве на больших расстояниях или при обнаружении объектов спрятанных за препятствиями с большим поглощением), необходимо использовать высокочувствительные приемники. В качестве примера такой системы на рисунке 1.11 представлена блок-схема активной системы терагерцевого радиовидения с супергетеродинным приемником в качестве приемного элемента [67].

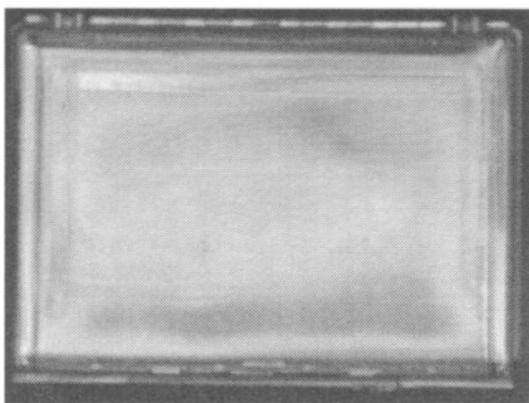
При проектировании оптической системы, предназначенной для работы в открытом помещении неизбежно приходится учитывать вклад переотражен-



Видимый диапазон



Верхняя часть пакета



Поверхность в ТГц диапазоне

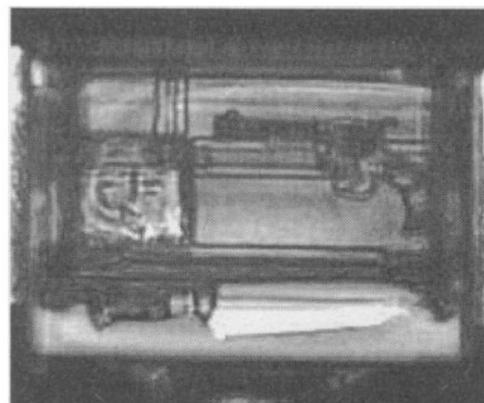


Рис. 1.9. Пример работы импульсной активной системы радиовидения, работающей с отраженным от объекта излучением [59]. Компенсация задержки в тракте сигнала позволяет получать изображения слоев расположенных внутри исследуемого объекта. Слева вверху приведена фотография исследуемого объекта (чемодан) в видимом диапазоне частот. Слева внизу приведено терагерцевое изображение поверхности объекта. Справа вверху приведено терагерцевое изображение пакета, лежащего внутри чемодана. И наконец, справа внизу представлено терагерцевое изображение содержимого пакета. На последней картинке отчетливо видны нож и пистолет, лежащие внутри исследуемого багажа.

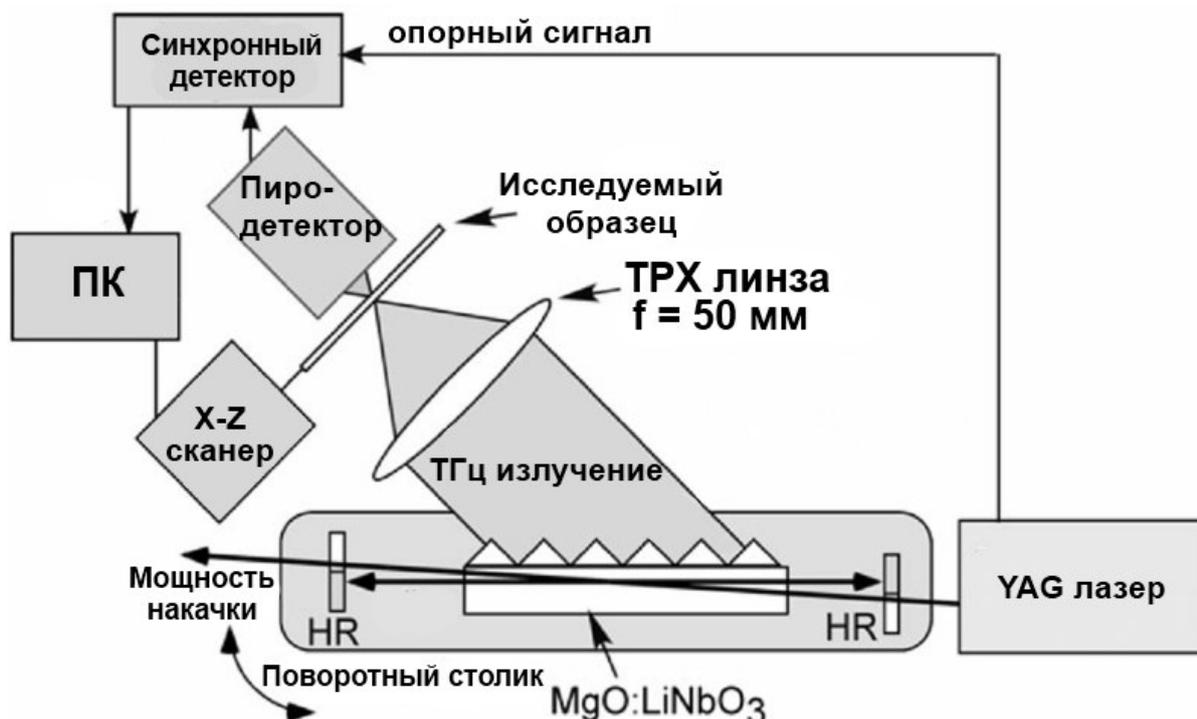


Рис. 1.10. Блок-схема терагерцового спектрометра, используемого при построении терагерцовых изображений [55].

ной мощности как от самого объекта наблюдения, так и от стен и других объектов, находящихся в помещении. Влияние таких переотражений приводит к серьезному искажению получаемых терагерцовых изображений, избежать которые можно лишь в специальных лабораторных условиях. Поэтому при использовании активных систем в системах построения изображений приводит к существенным искажениям изображений, вплоть до невозможности определить форму объекта (см. рис. 1.11).

1.3 Пассивные системы терагерцового радиовидения

Принцип работы систем пассивного радиовидения основан на регистрации мощности собственного теплового радиоизлучения объектов. Тепловое излучение носит шумовой характер и в области радиоволн имеет весьма низкую интенсивность. Спектральная плотность потока излучения абсолютно черного тела задается формулой Планка [68],

$$S_f = \frac{2\pi f^2}{c^2} \frac{hf}{e^{hf/k_B T} - 1}. \quad (1.2)$$

В области радиоволн, где $hf \ll k_B T$, формула Планка переходит в закон

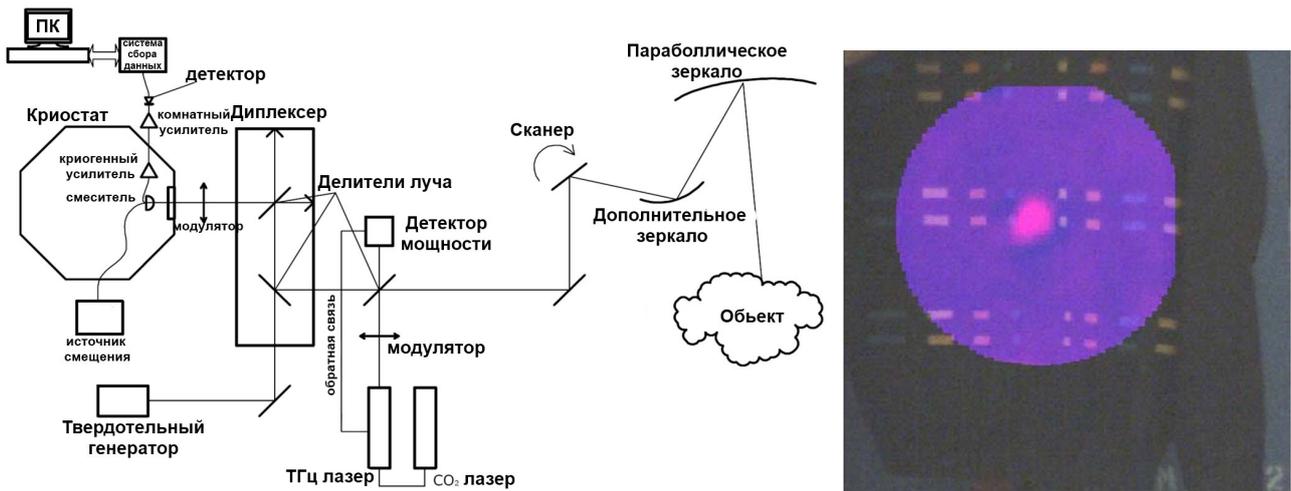


Рис. 1.11. Активная система терагерцевого радиовидения, использующая супергетеродинный приемник [67]. Слева представлена блок-схема системы получения радиоизображений, справа приведено терагерцевое изображение, совмещенное с видеоизображением человека. Объект наблюдения облучается при помощи терагерцевого лазера, снабженного обратной связью для стабилизации мощности. В качестве приемного элемента используется смеситель на эффекте электронного разогрева (НЕВ-смеситель). В качестве гетеродина используется твердотельный источник с умножителем частоты. Выходная мощность гетеродина достаточно мала и для согласования ее со смесителем приходится использовать поляризационный интерферометр Мартин-Паплетт. Оптическая схема приемника сложна и громоздка. При этом качество получаемого изображения низко: яркое пятно в центре изображения соответствует спрятанному под одеждой металлическому предмету, при этом распознать форму предмета невозможно.

Рэляя-Джинса,

$$S_f = \frac{2\pi f^2}{c^2} k_B T \quad (1.3)$$

Таким образом, интенсивность микроволнового излучения прямо пропорциональна физической температуре абсолютно черного тела (АЧТ), что ведет к заметному упрощению методов радиометрии и интерпретации данных. Для исследуемых объектов вводят понятие радиояркой температуры, которая равна физической температуре такого АЧТ, имеющего те же форму и размеры, которое создавало бы излучение такой же интенсивности в рассматриваемом частотном диапазоне, как и исследуемый объект [69]. Коэффициент пропорциональности между термодинамической T и радиояркой температурой T_S равен коэффициенту серости тела:

$$T_S = \epsilon T \quad (1.4)$$

В общем случае контраст получаемого изображения образуется из-за различных физических свойств и температур наблюдаемых предметов. Излучение каждого объекта складывается из трех частей: отраженного, прошедшего и собственного теплового излучения. Если для простоты пренебречь поглощением сигнала в атмосфере и в объекте, то выражение для радиояркой температуры, фиксируемой датчиком, запишется следующим образом:

$$T_S = rT_1 + tT_2 + \epsilon T_3 \quad (1.5)$$

где r – коэффициент отражения, t – коэффициент пропускания, ϵ – коэффициент серости. В силу закона сохранения энергии эти коэффициенты связаны соотношением $r+t+\epsilon \equiv 1$. T_S – наблюдаемая радиояркая температура; T_1 – радиояркая температура стороннего излучения, падающего на объект и отражающегося от него; T_2 – радиояркая температура стороннего излучения, падающего на объект и проходящего через него; T_3 – радиояркая температура самого объекта. Если объект состоит из хорошо поглощающего материала, то есть его коэффициент поглощения (и излучения) $\epsilon \approx 1$, то его наблюдаемая радиояркая температур близка к физической (термодинамической) температуре. Если же объект хорошо отражает (например, металл), то его видимая радиояркая температура будет соответствовать радиояркой температуре окружающих объект предметов, например неба [70].

Поскольку в пассивных системах построения изображений речь идет о сигнале, связанном с радиояркой температурой наблюдаемых объектов, мы вправе выражать выходной сигнал в единицах температуры, а подобный прибор по аналогии с инфракрасными системами приема теплового излучения можно называть терагерцовым тепловизором (для приборов радиодиапазона более употребляемое название – радиометр).

Существуют несколько отличающихся друг от друга подходов к построению пассивных систем терагерцевого радиовидения. Для этого могут быть использованы как приемники прямого детектирования, так и более сложные супергетеродинные приемники. Приемник прямого детектирования обладает преимуществом простоты, а следовательно и дешевизны. Другим важным его достоинством является то, что его чувствительность может быть безгранично улучшена за счет расширения входной полосы (это справедливо только теоретически, поскольку сделать действительно широкую входную полосу приемника крайне сложно). Шумы супергетеродинного приемника ограничены квантовыми шумами (на практике для всех существующих смесителей шумы в несколько раз превышают квантовый предел шума), и это является одним из основных ограничений чувствительности супергетеродинного приемника. Основным же достоинством супергетеродинного приемника является возможность получения спектральных характеристик наблюдаемых объектов. Это свойство супергетеродинного приемника делает его более выгодным в био-медицинских применениях и системах безопасности. В последующих параграфах будут описаны особенности применения пассивных систем и сравнение предельно достижимых чувствительностей приемников прямого детектирования и супергетеродинных приемников при использовании их в системах построения радиоизображений.

1.3.1 Пассивная система терагерцевого радиовидения, основанная на приемнике прямого детектирования

На рисунке 1.12 приведена блок схема типичного приемника прямого детектирования. Использование квадратичного детектора приводит к тому, что выходной сигнал приемника прямопропорционален радиояркостной температуре наблюдаемого объекта. Основным параметром определяющим чувствительность приемника в тепловизионных применениях является его флуктуационная чувствительность. Флуктуационная чувствительность приемника прямого детектирования (в англоязычной терминологии noise equivalent temperature difference – NETD) – это такое изменение физической температуры наблюдаемого абсолютно черного тела, которое приводит к изменению выходного сигнала детектора на величину, равную величине шума.

Основным параметром, определяющим чувствительность приемника прямого детектирования, является NEP (noise equivalent power – эквивалентная мощность шума), ширина входной полосы частот приемника B_D и ширина выходной полосы приемника, определяемая постоянной времени интегрирования сигнала τ . Выражение для флуктуационной чувствительности детекторного приемника следует из определения и может быть записано как [71]:



Рис. 1.12. Блок-схема приемника прямого усиления. На схеме блоками показаны усилитель высоких частот (УВЧ), квадратичный детектор (КД) и фильтр низких частот (ФНЧ).

$$\Delta T_D = \frac{U_N}{S \times dP_{inc}/dT}, \quad (1.6)$$

где U_N – амплитуда шума на выходе приемника, S – его вольт-ваттная чувствительность, dP_{inc}/dT – скорость изменения величины падающей мощности при изменении яркостной температуры наблюдаемого объекта. Учитывая тот факт, что в субмиллиметровом и терагерцевом частотных диапазонах для объектов комнатной температуры все еще выполняется соотношение Рэлея-Джинса, выражение (1.6) можно преобразовать к следующему:

$$\Delta T_D = \frac{NEP}{Mk_B B_D \tau^{1/2}}, \quad (1.7)$$

здесь NEP – эквивалентная мощность шума, k_B – постоянная Больцмана и M – число пространственных мод, принимаемых антенной приемника.

Чувствительность приемника может быть улучшена расширением входной полосы частот приемника, а также увеличением времени интегрирования, однако получить бесконечно малое значение ΔT_D все же невозможно. Основными препятствиями в этом служат следующие факторы.

Во-первых, изготовление широкополосных приемных антенн терагерцевого диапазона частот, сопряженных с чувствительным элементом приемника, достаточно сложная задача. В качестве наиболее широкополосной в терагерцевом диапазоне частот используется логопериодическая спиральная антенна, при этом относительная ширина полосы такой антенны $B_D/F_0 \simeq 1.6-1.7$ [72], где F_0 – центральная частота антенны.

Вторым ограничивающим фактором является тот факт, что с увеличением постоянной времени, существенную роль в формировании значения ΔT_D начинают вносить дрейфы системы, связанные с нестабильностью питания приемника, а следовательно, увеличение постоянной времени разумно лишь до некоторого значения. Особо следует отметить, что создание высокостабильных во времени приемных систем отдельная весьма сложная задача. Кроме того, при конструировании систем построения радиоизображений реального

времени время накопления определяется частотой смены кадров и увеличение постоянной времени до единиц секунд уже крайне нежелательно. И наконец последнее ограничение вносят флуктуации температуры фона, приводящие к ограничению NEP , что является очень важным при создании систем радиовидения, ориентированных на работу с объектами комнатной температуры.

Приведем теоретический расчет предельного значения флуктуационной чувствительности на примере болометрического приемника на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках [73]. Для подобного приемника существует несколько вкладов в его шумы, среди которых можно назвать джонсоновский шум, шумы флуктуации температуры приемника и шумы флуктуации температуры фона (речь идет о флуктуации температуры наблюдаемого объекта). Помимо этого существуют еще и фликкер-шумы, природа которых часто бывает не совсем ясна, а интенсивность с увеличением частоты сигнала существенно уменьшается. В пределе, когда собственные шумы приемника будут бесконечно малы, его чувствительность будет определяться только шумами флуктуации температуры наблюдаемого объекта. В этом случае

$$NEP \geq \sqrt{\frac{8\sigma k_B T_S^5 S \Omega}{\alpha}}, \quad (1.8)$$

здесь σ – постоянная Стефана-Больцмана, T_S – радиояркая температура наблюдаемого объекта, S – площадь чувствительного элемента детектора, Ω – телесный угол, в котором излучение приходит от объекта на детектор, α – коэффициент, связанный с эффективностью согласования падающего излучения с антенной детектора. Выбирая в качестве переменных величин стандартные значения для болометрических детекторов на эффекте электронного разогрева в сверхпроводниках, получим предельное значение для $NEP \sim 10$ фВт/Гц^{0.5}. При ширине входной полосы $B_D = 0.5$ ТГц и постоянной времени $\tau = 1$ с для приемника, снабженного одномодовой антенной, величина $\Delta T_D \geq 5$ мК.

Приведенный расчет соответствует реальному положению дел в области построения пассивных приемников терагерцового диапазона. Такие высокочувствительные приемники как детекторы на кинетической индуктивности (KID – kinetic inductance detector) и детекторы на сверхпроводящем переходе (TES – transition edge sensor) [74, 75], обладающие превосходными шумовыми характеристиками, теряют свои уникальные свойства при наблюдении объектов, находящихся в условиях земной поверхности.

В качестве примера пассивной терагерцовой системы построения изображений, основанной на приемнике прямого детектирования, приведем результаты опубликованные в работах [76–78] (см. рисунок 1.13). Описываемая в этих работах, достаточно удачная по своим характеристикам приемная система основана на сверхпроводящем микроболометре, изготовленном по

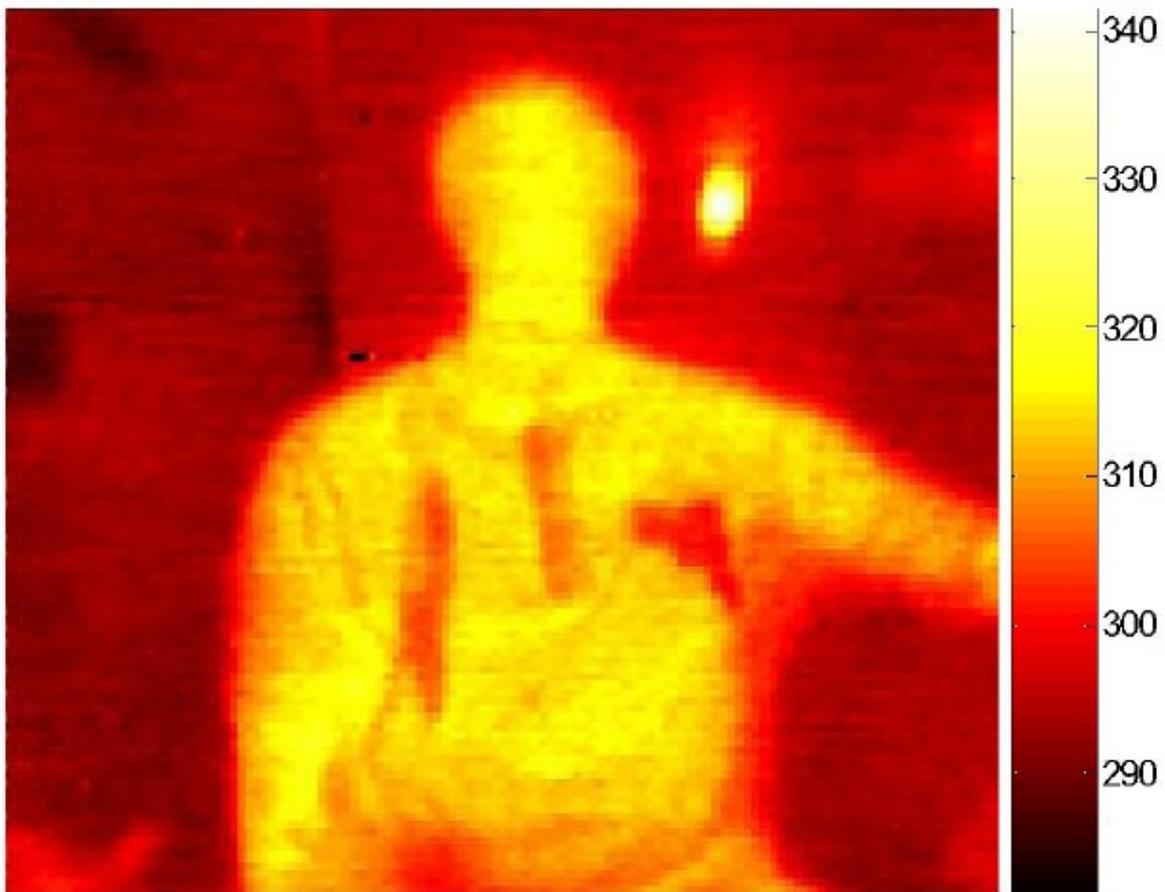


Рис. 1.13. Терагерцовое изображение (диапазон частот 0.1–1 ТГц)

технологии «вакуумный мост» («vacuum-bridge» или «air-bridge»). Представленное изображение получено с флуктуационной чувствительностью 125 мК при времени получения одного пиксела ~ 10 мс (в той же работе приведено значение флуктуационной чувствительности 2.5 мК при постоянной времени 30 мс без учета влияния оптических потерь и шумов флуктуации температуры наблюдаемого объекта). Пространственное разрешение представленного изображения ~ 1 см.

Также стоит упомянуть, как о наиболее передовой, о ММИС технологии (монолитные микроволновые интегральные схемы, от англ. Monolithic Microwave Integrated Circuits) создания приемников прямого детектирования [58]. В этом случае приемник снабжается УВЧ, работающих на НЕМТ транзисторах (транзисторы с высокой подвижностью электронов, от англ. high electron mobility transistor) [79–81]. Данная технология позволяет создавать приемные системы с рабочими частотами до 300 ГГц [82].

Особо следует отметить тот факт, что благодаря простоте приемника прямого детектирования возможно создание матричных приемников. Такое усложнение приемника позволит получать терагерцевые изображения без использования сложных сканирующих систем, помимо этого чувствительность

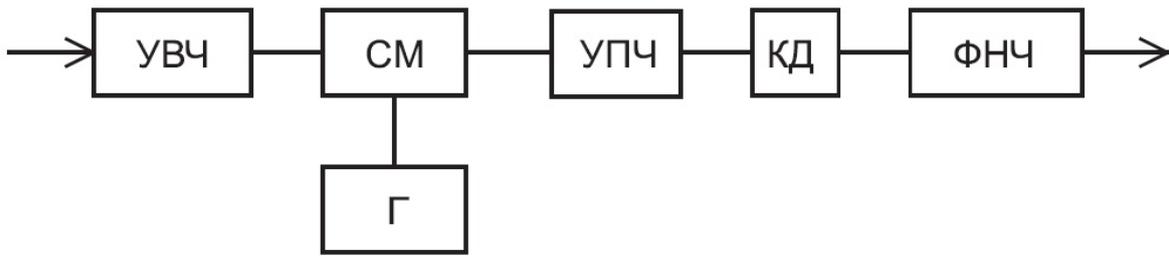


Рис. 1.14. Блок-схема супергетеродинного приемника. На схеме блоками показаны усилитель высоких частот (УВЧ) (практически по всех приемниках терагерцового диапазона частот данный блок отсутствует), смеситель (СМ), гетеродин (Г), усилитель промежуточной частоты (УПЧ), квадратичный детектор (КД) и фильтр низких частот (ФНЧ).

матричного приемника увеличивается за счет использования большего количества приемников в \sqrt{N} раз, где N – число элементов матричного приемника. Ранее матричные приемники разрабатывались исключительно для астрономических наблюдений (проекты SCUBA, SCUBA2). Вместе с тем, продолжающееся развитие детекторов терагерцового диапазона частот позволяет надеяться на скорое создание терагерцевых матричных детекторных приемников широкого применения.

1.3.2 Пассивная система терагерцового радиовидения, использующая супергетеродинный приемник

На рисунке 1.14 представлена блок схема типичного супергетеродинного приемника. Ключевым элементом супергетеродинного приемника является нелинейный элемент – смеситель. При попадании на него двух монохроматических волн (гетеродин и сигнал) на выходе смесителя возникает большое количество гармоник на частотах $(nf_G \pm mf_S)$. Здесь $n, m \in Z$, f_G – частота гетеродина, f_S – частота сигнала. При использовании квадратичного смесителя число гармоник в выходном сигнале ограничено. Основная работа ведется с гармоникой на частоте $|f_G - f_S|$, называемой промежуточной частотой. Мощность данной гармоники пропорциональна мощности сигнала. При помощи усилителя промежуточной частоты отсеиваются все лишние гармоники и напряжение на выходе квадратичного детектора пропорционально мощности входного сигнала, или его радиояркостной температуре.

Основными характеристиками смесителей являются ширина полосы промежуточных частот (ширина ”окна” вокруг частоты гетеродина, в котором собирается информация), динамический диапазон (диапазон измеряемых мощностей) и шумовая температура (мера собственных шумов смесителя).

Среди наиболее развитых смесителей терагерцового диапазона частот можно назвать смесители на диодах с барьером Шоттки [41], СИС смесители [44]

и НЕВ смесители [83]. На рисунке 1.15 [83] представлены шумовые характеристики перечисленных терагерцевых смесителей. Каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. Так ДБШ способны работать без дополнительного охлаждения, но при этом требуют достаточно большую мощность гетеродина (~ 1 мВт), что в терагерцевом диапазоне частот является серьезной проблемой.

СИС смесители (смесители на квазичастичной нелинейности вольт-амперной характеристики туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) обладают шумовой температурой сравнимой с квантовыми шумами и теоретически неограниченной полосой промежуточных частот, но при этом их рабочий диапазон частот ограничен сверху величиной $2\Delta/h$, здесь Δ – величина энергетической щели сверхпроводника, h – постоянная Планка. Выше данной частоты шумовая температура СИС смесителя начинает резко возрастать.

НЕВ смесители (hot electron bolometer mixers – смесители на эффекте электронного разогрева в сверхпроводниках) также обладают шумовой температурой лишь в несколько раз превышающей квантовый предел $hf/2k_B$, однако равномерный электронный разогрев в таких приемниках возможен только при частотах гетеродина $\geq \Delta/h$, ниже данной частоты шумовая температура НЕВ-смесителя хоть и незначительно, но возрастает, уступая при этом по шумовым характеристикам СИС-смесителям.

В качестве терагерцевых гетеродинов могут быть использованы лампы обратной волны (ЛОВ) [84], газовые лазеры, генераторы Ганна [85–87] с полупроводниковыми умножителями [88], а также квантовый каскадный лазер [89–92]. Помимо этого, существуют и сверхпроводниковые генераторы на вязком течении джозефсоновских вихрей (FFO-flux flow oscillator) [47–50]. Эта технология может быть использована для создания интегральных супергетеродинных приемников на базе СИС-смесителей [93] или НЕВ-смесителей.

Для сравнения характеристик супергетеродинного приемника и приемника прямого детектирования применительно к использованию их в пассивных терагерцевых системах радиовидения также можно ввести понятие флуктуационной чувствительности. Для супергетеродинного приемника в случае большого сигнала флуктуационная чувствительность определяется в соответствии с формулой [69]:

$$\Delta T_H = \alpha \frac{T_R}{\sqrt{B_H \tau}} \sqrt{1 + \frac{T_S}{T_R} + \frac{3}{8} \left(\frac{T_S}{T_R} \right)^2}, \quad (1.9)$$

здесь ΔT_H – флуктуационная чувствительность супергетеродинного приемника, T_R – шумовая температура приемного устройства, T_S – радиояркость наблюдаемого объекта, B_H – ширина полосы промежуточных частот, τ – постоянная времени фильтра низких частот, α – безразмерный коэффициент порядка единицы, величина которого меняется от 2 до 4

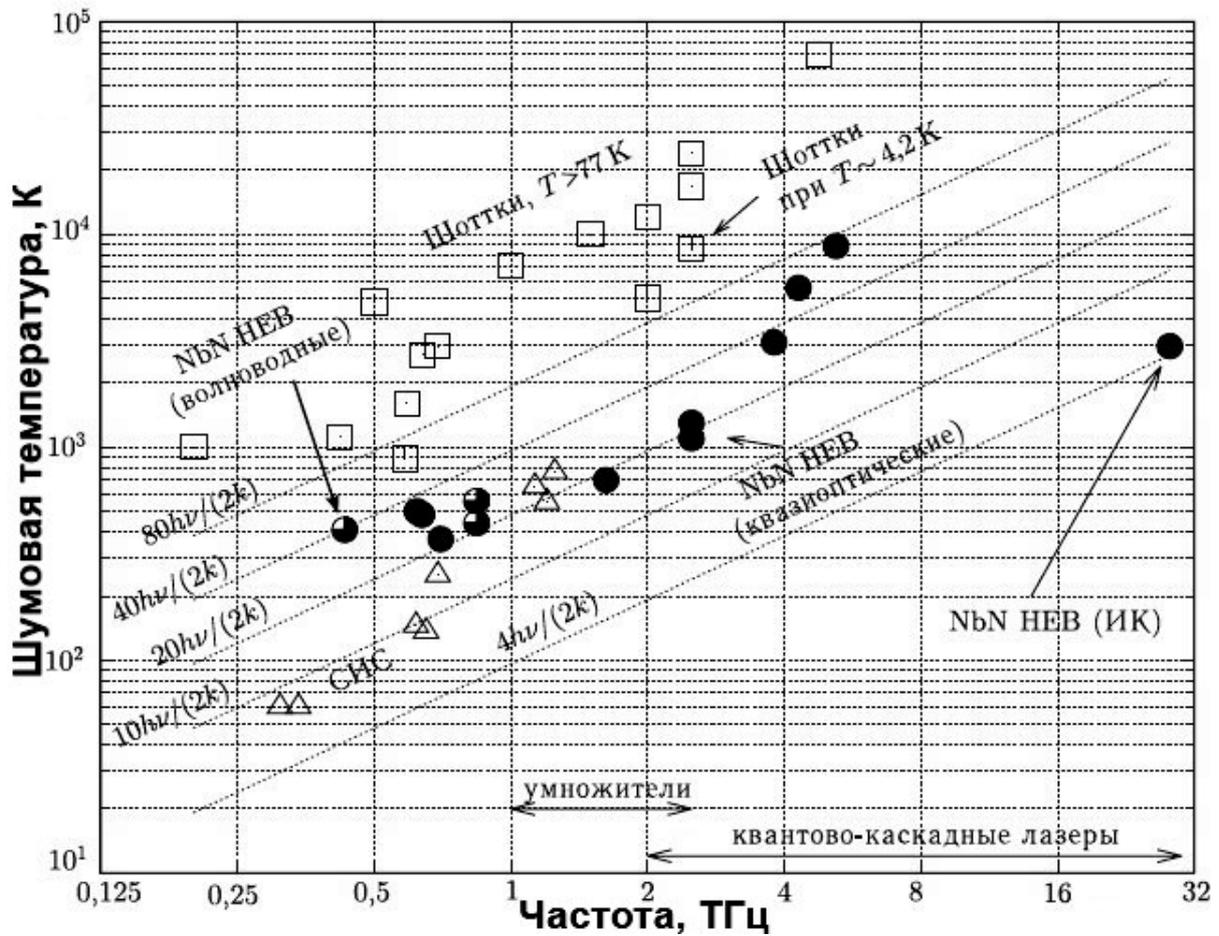


Рис. 1.15. Зависимость двухполосной шумовой температуры T_R от типа смесителя и частоты гетеродина, НЕВ смесители представлены как в квазиоптической, так и в волноводной модификациях [83].

и зависит от выбора схемы приемника. Выражение $\sqrt{B_H \tau}$ принято называть радиометрическим выигрышем, и обозначать через q .

Наиболее часто в литературе встречается другая формула, являющаяся частным случаем формулы (1.9) в пределе, когда шумовая температура приемника существенно превышает радиояркую температуру наблюдаемого объекта.

$$\Delta T_H = \alpha \frac{T_R}{q}. \quad (1.10)$$

На рисунке 1.16 приведены зависимости флуктуационной чувствительности от шумовой температуры смесителя, выраженные формулами (1.9) и (1.10), при температуре наблюдаемого объекта равной 300 К. При этом заметные отклонения от линейного закона в формуле (1.9) начинают проявляться уже при шумовых температурах смесителя ~ 500 К. Исходя из этого можно сделать вывод, что дальнейшее снижение шумовой температуры приемника не имеет смысла и улучшение флуктуационной чувствительности приемника можно достичь лишь за счет увеличения радиометрического выигрыша, то есть расширением полосы промежуточных частот и увеличением постоянной времени интегрирующей цепи (фильтра низких частот).

Приведем теоретический расчет предельного значения флуктуационной чувствительности супергетеродинного приемника. Для НЕВ смесителей рекордные значения ширины полосы промежуточных частот составляют ~ 6 ГГц [94], для СИС смесителей теоретического ограничения полосы промежуточных частот нет, однако реализовать действительно широкую полосу преобразования на практике очень сложно. Сложность прежде всего определяется необходимостью использовать широкополосные охлаждаемые усилители промежуточной частоты. В настоящее время существуют разработки охлаждаемых усилителей, в которых реализована полоса усиления до 12 ГГц [95, 96]. При ширине полосы промежуточных частот $B_H = 12$ ГГц, шумовой температуре $T_R = 200$ К, постоянной времени $\tau = 1$ с и $\alpha = \pi$ (для схемы модуляционного радиометра с прямоугольной модуляцией и синусоидальной демодуляцией) флуктуационная чувствительность будет составлять $\Delta T_H \sim 9$ мК. Полученное значение не существенно отличается от теоретического предела флуктуационной чувствительности, полученной для терагерцевого приемника прямого детектирования. Однако, использование супергетеродинного приемника несет в себе явные плюсы (возможность получения спектральной информации), делающие его незаменимым при проектировании систем построения терагерцевых изображений. Анализ литературы, проведенный в данной главе выявил отсутствие работ по созданию пассивных систем радиовидения субмиллиметрового и терагерцевого диапазона частот, основанных на супергетеродинных приемниках. При этом теоретический предел флуктуационной чувствительности супергетеродинного приемника совпадает по порядку ве-

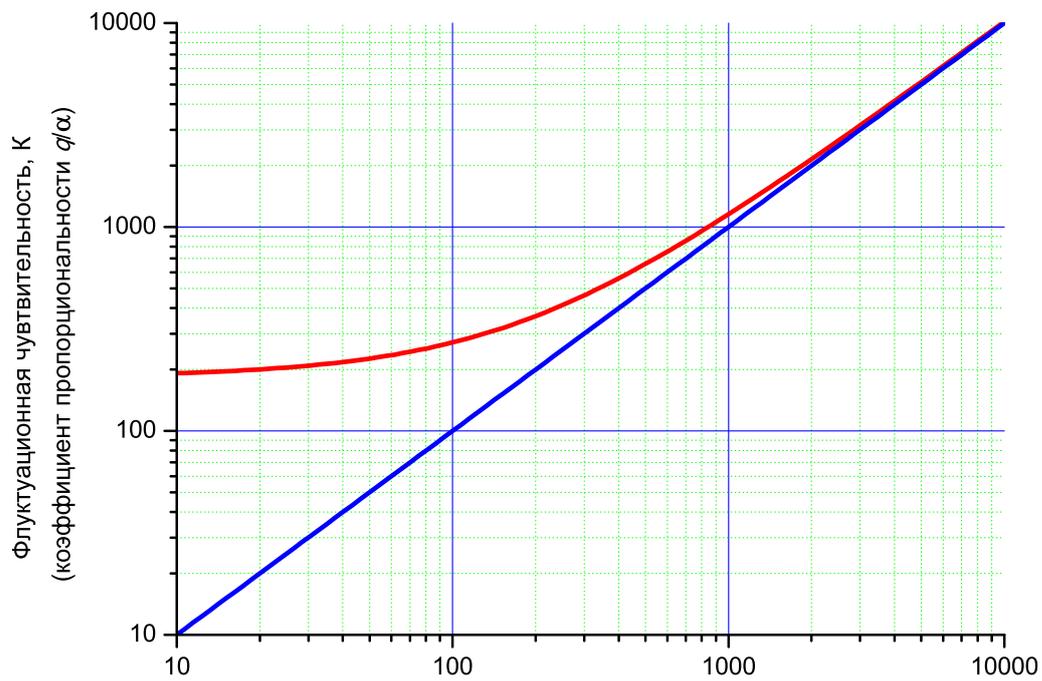


Рис. 1.16. Зависимость флуктуационной чувствительности от шумовой температуры смесителя, для получения точного значения ΔT_H необходимо поделить значение на графике на q/α . Красная линия соответствует выражению (1.9) (температура наблюдаемого объекта – 300 К), синяя – формуле (1.10).

личины с соответствующим значением для лучших приемников прямого детектирования. Супергетеродинный приемник обладает рядом преимуществ по сравнению с приемником прямого детектирования, а именно: возможностью измерения спектральных характеристик теплового излучения объектов, наблюдаемых в пассивном режиме, а также получением информации о фазе принимаемого сигнала.

В качестве наиболее перспективных приемников терагерцового диапазона частот выбор был остановлен на НЕВ смесителе (hot electron bolometer mixer или смеситель на эффекте электронного разогрева в сверхпроводящих пленках) и СИП (сверхпроводящий интегральный приемник на базе СИС смесителя и интегрированного с ним гетеродина FFO) поскольку на частотах выше 1.2 ТГц, лучшие характеристики показывает НЕВ смеситель, а на частотах ниже – СИС смеситель (см. рис. 1.15).

В качестве объектов исследования были разработаны, изготовлены и исследованы лабораторные макеты пассивных терагерцевых супергетеродинных тепловизоров на базе НЕВ смесителя и сверхпроводникового интегрального приемника. Исследование флуктуационной чувствительности разработанных и изготовленных лабораторных макетов супергетеродинных тепловизоров, и достижение предельных значений флуктуационной чувствительности приемников, увеличение временной стабильности макетов и получение тепловых терагерцевых изображений различных объектов являются важными задачами, которые необходимо решить для создания практической системы построения радиоизображений.

Глава 2

Смеситель на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках

Смесители на эффекте электронного разогрева в сверхпроводящих пленках занимают особое место среди приемников терагерцового диапазона частот. Среди основных достоинств этих приемников можно выделить малую требуемую мощность гетеродина, низкую шумовую температуру, всего лишь в несколько раз превышающую квантовый предел шума, широкую полосу промежуточных частот, а также широкий рабочий диапазон частот, вплоть до 70 ТГц [46]. В данной главе изложены результаты исследования лабораторного макета терагерцового тепловизора на базе супергетеродинного приемника с НЕВ смесителем в качестве приемного элемента, а также обсуждаются полученные характеристики лабораторного макета. Основные результаты главы были опубликованы ранее в работах [97–103].

2.1 Методика измерения флуктуационной чувствительности НЕВ-смесителя

В рамках проведенного исследования был изготовлен лабораторный макет терагерцового тепловизора на базе НЕВ смесителя. Приемник был включен в радиометрический тракт. Разработанный лабораторный макет позволял изучать флуктуационные характеристики НЕВ-смесителя. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.1. НЕВ-смеситель, согласованный с планарной спиральной антенной, крепится на гиперполусфериче-

ской линзе, изготовленной из высокорезистивного кремния. Линза со смесителем крепилась при помощи специального держателя к холодной плате вакуумного гелиевого криостата HDL-8 производства Infrared Laboratories. На холодную плату криостата также крепятся адаптер смещения и малошумящий криогенный усилитель.

При помощи адаптера смещения смеситель подсоединялся к тракту промежуточных частот и источнику постоянного смещения. Тракт ПЧ состоит из малошумящего криогенного усилителя снабженного циркулятором, полосно-пропускающего фильтра и цепочки усилителей комнатной температуры. Полоса рабочих частот тракта ПЧ 1.25–1.75 ГГц при коэффициенте усиления ~ 70 дБ. Полоса тракта ПЧ обуславливалась использованием полоснопропускающего фильтра с полосой пропускания 200 МГц с центральной частотой пропускания вблизи 1.5 ГГц. На выход тракта ПЧ помещался быстродействующий детектор (DZM185AA производства компании Herotek с рабочим частотным диапазоном 10 МГц — 18.5 ГГц), подключенный к синхронному усилителю (Lock-in amplifier EG&G PARC model 124A). Выходное напряжение синхронного усилителя измерялось при помощи универсального мультиметра Agilent34401A и далее значение напряжения, измеряемое мультиметром, обрабатывалось персональным компьютером при помощи оригинального программного обеспечения, предназначенного для записи временных зависимостей выходного сигнала радиометрического тракта, с последующим анализом его статистических и спектральных характеристик.

В качестве гетеродина использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) миллиметрового диапазона длин волн ОВ-30. Все измерения были проведены на частоте гетеродина ~ 300 ГГц.

В качестве источника сигнала использовалась нагрузка, изготовленная из материала ECCOSORB [104] с изменяемой температурой. Данный материал по своим свойствам достаточно близок к абсолютно черному телу в терагерцевом диапазоне частот. Тепловое излучение нагрузки модулировалось при помощи механического обтюлятора, лопасти которого были покрыты материалом аналогичным материалу нагрузки. Температура лопастей обтюлятора оставалась комнатной в течение всего эксперимента. Частота вращения обтюлятора могла изменяться в диапазоне 5–400 Гц. Приведенная блок-схема соответствует радиометру с пилот-сигналом [69], в котором в качестве пилотного сигнала используется тепловое излучение материала лопастей обтюлятора.

Установка позволяет измерять шумовую температуру методом взаимозаменяемых холодной и горячей нагрузок, используя стандартную методику

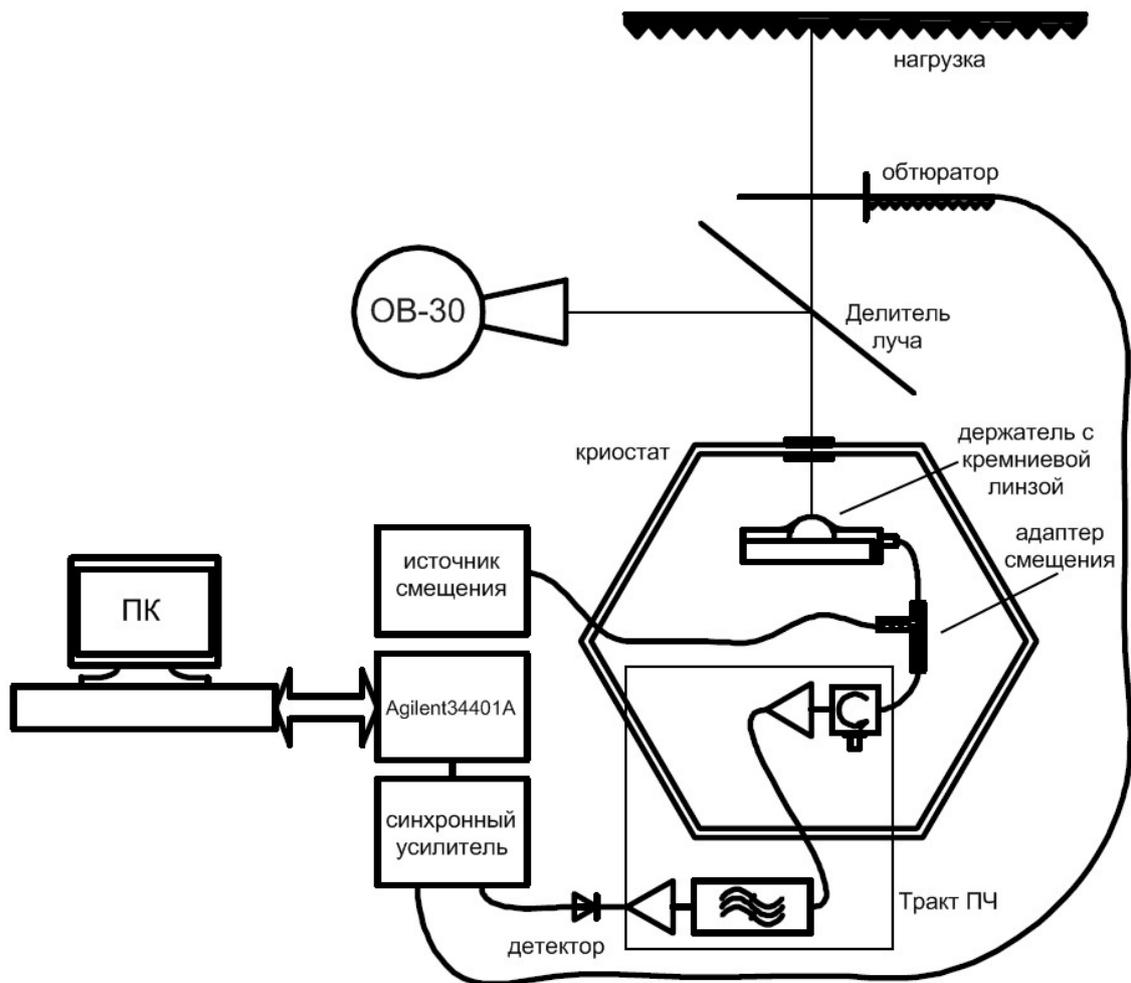


Рис. 2.1. Блок схема экспериментальной установки, предназначенной для изучения флуктуационных характеристик НЕВ-смесителя.

измерения Y -фактора, в соответствии с выражениями:

$$Y = \frac{U_H}{U_C} = \frac{T_R + T_H}{T_R + T_C},$$

$$T_R = \frac{T_H - Y T_C}{Y - 1}, \quad (2.1)$$

здесь U_H – напряжение на выходе квадратичного детектора при помещенной на вход приемника согласованной нагрузки с температурой T_H , U_C – напряжение детектора при температуре согласованной нагрузки T_C , T_R – шумовая температура приемника. Обычно при измерениях шумовой температуры НЕВ смесителя за T_H принимают комнатную температуру (295–300 К в зависимости от условий проведения эксперимента). В качестве второй температуры согласованной нагрузки выбирается температура кипения жидкого азота (77 К). Настройка оптимальной по шумовой температуре рабочей точки смесителя производится изменением мощности гетеродина и величины напряжения смещения по методике, изложенной в работе [105].

Лабораторный макет также позволял определять флуктуационную чувствительность приемника в двухполосном режиме преобразования с изменяемой постоянной времени. Для проведения подобных измерений необходимо записывать временные зависимости сигнала с выхода синхронного усилителя. При этом за флуктуационную чувствительность принималось стандартное отклонение сигнала, выраженное в единицах температуры, т.е.

$$\Delta T_H = \frac{\sqrt{\overline{U^2} - \bar{U}^2}}{\bar{U}} T_S. \quad (2.2)$$

В приведенном выражении $\sqrt{\overline{U^2} - \bar{U}^2}$ – стандартное отклонение сигнала с выхода синхронного усилителя, \bar{U} – среднее значение сигнала, T_S – радиояростная температура согласованной нагрузки. U – отсчеты сигнала, сделанные за равные промежутки времени $\Delta t \geq \tau$, где τ – постоянная времени выходного фильтра низких частот. В большинстве экспериментов, описанных далее, в качестве постоянной времени выбиралась 1 сек, при этом время накопления составляло ~ 100 – 200 сек. Погрешность измерения флуктуационной чувствительности в этом случае была не хуже 10%.

Помимо этого использование лабораторной установки делает возможным исследование спектра выходной нестабильности мощности гетеродина и влияния изменения мощности гетеродина на характеристики смесителя. Исследование этих характеристик необходимо при изучении влияния нестабильности гетеродина на характеристики приемника.

Материал подложки	Si с подслоем MgO (400 нм)
Толщина пленки NbN	3.5 нм
Поверхностное сопротивление пленки	400-459 Ω/\square
Критическая температура сверхпроводящего перехода пленки NbN (T_C)	11.73 К
Ширина сверхпроводящего перехода пленки NbN (ΔT_C)	0.6 К
Контактные площадки	NbN(3.5 нм) - Ti(3.0 нм) - Au(30.0 нм)
Внутренние контакты	NbN(3.5 нм) - Cr(3.0 нм) - Au(70.0 нм) - Ti(8.0 нм)
Внешние контакты	NbN(3.5 нм) - Ti(5.0 нм) - Au(200.0 нм) - Ti(10.0 нм)
Покрытие	SiO (70 нм)
Размер чувствительного элемента	3 x 0.23-0.24 μm^2

Таблица 2.1. Параметры изготовления образцов.

2.2 Экспериментальные результаты и методы достижения предельных значений флуктуационной чувствительности

Для проведения исследований флуктуационной чувствительности НЕВ смесителя была подготовлена партия чипов приемников с рабочим названием "Thermovision". Для этой партии была разработана топология логопериодической спиральной антенной, предназначенной для работы в диапазоне частот 0.2 – 2 ТГц. Параметры изготовления образцов представлены в таблице 2.1. Параметры отдельных образцов представлены в таблице 2.2. В таблице приведены следующие параметры: R_{300} – сопротивление смесителя при комнатной температуре, R_{20} – сопротивление смесителя вблизи сверхпроводящего перехода при температуре 20 К, T_C – критическая температура сверхпроводящего перехода, ΔT_C – ширина сверхпроводящего перехода смесителя.

Типичные зависимости сопротивления образца от температуры показаны на рисунке 2.2, также на этом рисунке показана фотография чувствительного элемента приемника, выполненная при помощи электронного микроскопа. Типичные вольт амперные характеристики НЕВ смесителя при различных уровнях накачки от гетеродина с частотой 300 ГГц приведены на рисунке 2.3 (на примере приемника Thermovision#6). Область с оптимальной шумовой температурой на этой частоте крайне узка и находится вблизи области регенерации, обладающей повышенными шумами. При этом даже при мощ-

№ приемника	R_{300} (Ω)	R_{20} (Ω)	T_C (К)	ΔT_C (К)
2	60	79	10.9	1.0
4	52	69	11.1	0.8
6	63	84	11.0	0.9
7	60	79	11.2	0.7
10	48	64	11.3	0.8
11	79	107	10.7	1.5
12	37	49	11.4	0.7
13	39	51	11.4	0.9
15	85	109	11.1	1.3

Таблица 2.2. Параметры образцов партии Thermovision.

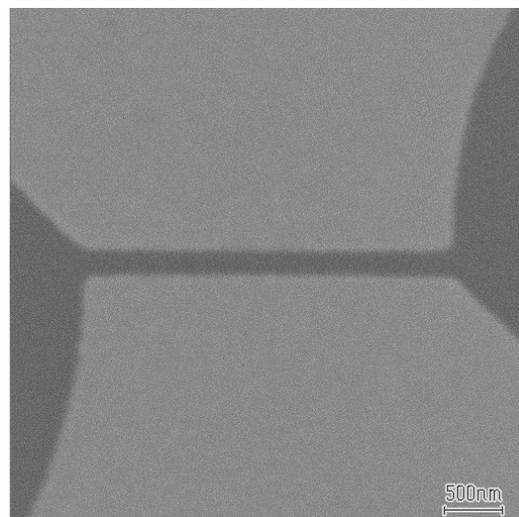
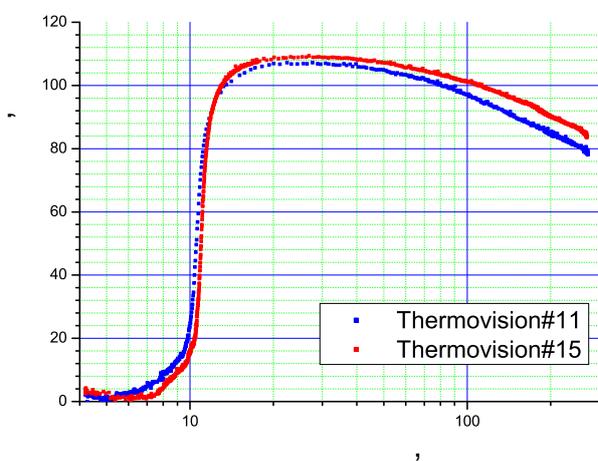


Рис. 2.2. Слева приведены типичные зависимости сопротивления от температуры для партии Thermovision (Образцы #11, #15). Справа – фотография полученная с электронного микроскопа контактных площадок образца #11. Чувствительный элемент с размерами $3 \times 0.23-0.24 \mu\text{m}^2$ находится в зазоре между контактами.

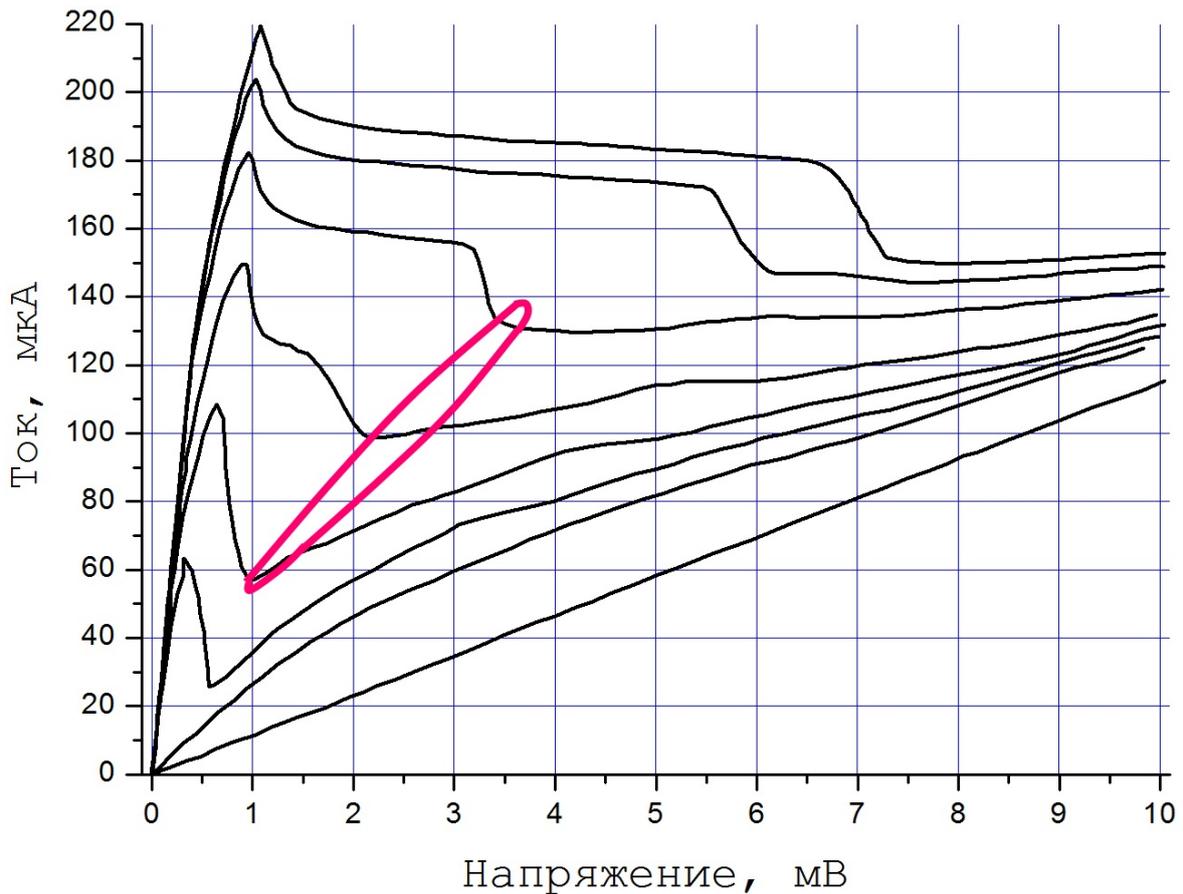


Рис. 2.3. Типичные вольт амперные характеристики НЕВ смесителя при различных уровнях накачки гетеродина с частотой 300 ГГц (приемник Termovision#2). Верхняя кривая – смеситель в отсутствии гетеродина. Овалом помечена область с оптимальной шумовой температурой.

ностях гетеродина, превышающих оптимальную, пик критического тока не пропадает.

Далее все экспериментальные данные будут продемонстрированы на примере образца Termovision#6. Для этого приемника значение шумовой температуры составляло около 2000 К. Значение флуктуационной чувствительности должно определяться в соответствии с формулами (1.9) и (1.10). Однако, полученные в первых экспериментах значения ΔT_H существенно превышали предельные значения, которые следуют из этих формул (измеренные экспериментально значения флуктуационной чувствительности на порядок превосходили расчетные значения). Прежде всего это связано с наличием паразитных флуктуаций, минимизацией которых в системах наблюдения астрономических объектов посвящен целый ряд работ [106, 107]. Предлагаемые в данных работах методы предполагают изменение приборной базы, установку дорогостоящих устройств, лишенных нежелательных флуктуаций. Предлагаемый

способ решения дает хороший результат, являясь при этом крайне сложным в исполнении и требующим больших денежных затрат. Настоящий раздел посвящен разработке простого и не требующего дополнительных затрат метода достижения предельной флуктуационной чувствительности супергетеродинного приемника, основыванного только на математическом анализе процессов детектирования сигнала.

Выходная мощность тракта ПЧ зависит не только от радиояркостной температуры наблюдаемого объекта, но и от стабильности рабочей точки, положение которой зависит от тока смещения смесителя и мощности гетеродина, стабильности температуры приемника. Также может влиять на работу приемника и стабильность коэффициента усиления тракта ПЧ. В рамках исследования было решено остановиться лишь на стабильности источника смещения и мощности гетеродина. Вклады от других видов нестабильности считались малыми по сравнению с рассматриваемыми величинами. В дальнейшем будет показано, что стабильность положения рабочей точки определяет флуктуационную чувствительность приемника. Выходная мощность тракта ПЧ является функцией величины сигнала, мощности гетеродина и тока смещения смесителя. В этом случае, малое изменение выходной мощности тракта ПЧ можно представить в виде:

$$\Delta P_{OUT}(T_S, P_H, I) = \frac{\partial P_{OUT}}{\partial T_S} \Delta T_S + \frac{\partial P_{OUT}}{\partial P_H} \Delta P_H + \frac{\partial P_{OUT}}{\partial I} \Delta I, \quad (2.3)$$

где T_S – радиояркостная температура наблюдаемого объекта, P_H – мощность гетеродина, I – ток смещения смесителя. Первое слагаемое определяет флуктуационную чувствительность приемника, соответствующую формуле (1.9). Паразитный вклад определяется последними двумя слагаемыми в приведенном выше выражении. Поскольку паразитные флуктуации в первых экспериментах превышали на порядок флуктуации, связанные с флуктуациями температуры наблюдаемого объекта, первым слагаемым в этом выражении можно пренебречь.

Для выявления происхождения паразитных флуктуаций были получены зависимости выходной мощности тракта ПЧ от мощности гетеродина и тока смещения. Графики этих зависимостей приведены на рисунке 2.4. Анализируя поведение аппроксимационных кривых, можно сделать оценку частных производных $\partial P_{OUT}/\partial I$ и $\partial P_{OUT}/\partial P_H$ в области рабочей точки. Далее, в рабочей точке записывалась величина выходной мощности тракта ПЧ от времени и оценивалось ее стандартное отклонение (ΔP_{OUT}). Зная эту величину, можно получить "действующие" значения ΔP_H и ΔI (имеется в виду те величины ΔP_H и ΔI , которые должны действовать в приемнике, чтобы получить существующую нестабильность выходной мощности тракта ПЧ в отсутствие других источников нестабильности).

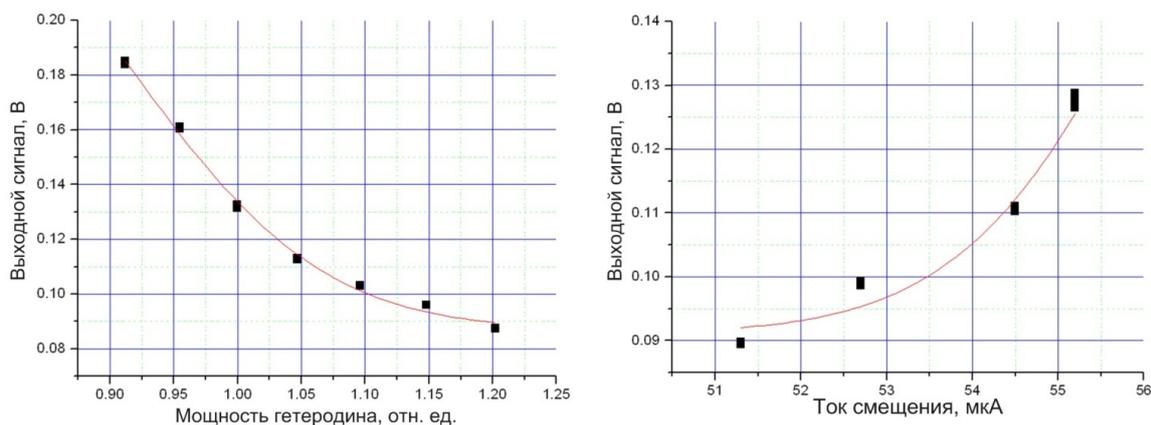


Рис. 2.4. Экспериментальные зависимости выходной мощности тракта ПЧ от мощности гетеродина и тока смещения. Линиями показаны аппроксимационные кривые. По оси ординат отложена величина продетектированного напряжения. Напряжение выходного сигнала квадратичного детектора пропорционально выходной мощности тракта ПЧ, т.е. $U_{det} = CP_{OUT}$, где $C = \text{Const}$.

Величина $\Delta I = (\partial P_{OUT} / \partial I)^{-1} \Delta P_{OUT}$ соответствует величине нестабильности тока смещения в 0.1 мкА. В отдельном эксперименте была проведена запись тока смещения источника питания от времени. Стандартное отклонение величины тока составило 6 нА. Это значение существенно ниже расчетного. Исходя из этого, можно сделать вывод, что нестабильность источника смещения смесителя не вносит существенного вклада в флуктуационную чувствительность приемника.

С другой стороны, величина $\Delta P_H = (\partial P_{OUT} / \partial P_H)^{-1} \Delta P_{OUT}$, соответствует величине нестабильности мощности гетеродина в 0.4%. В отдельном эксперименте была проведена запись выходной мощности гетеродина от времени. Стандартное отклонение величины мощности составило 0.3%. Приведенные цифры говорят о существенном влиянии нестабильности гетеродина при формировании флуктуационной чувствительности приемника. Для устранения этого влияния была исследована спектральная зависимость выходной мощности гетеродина, представленная на рисунке 2.5. Нестабильность мощности гетеродина связана с фликкер-шумом на низких частотах и гармониками сетевой наводки, и при частотах выше 300 Гц вклад нестабильностей гетеродина будет существенно снижен. Данная зависимость коррелирует с экспериментальными результатами измерения флуктуационной чувствительности при различных частотах модуляции сигнала (рис. 2.6). Из графика видно, что, начиная с 200 Гц, флуктуационная чувствительность является слабозависящей от частоты модуляции сигнала. Однако, за счет увеличения частоты модуляции сигнала не удастся достигнуть предельной флуктуационной чувствительности (наименьшее полученное значение флуктуационной чувстви-

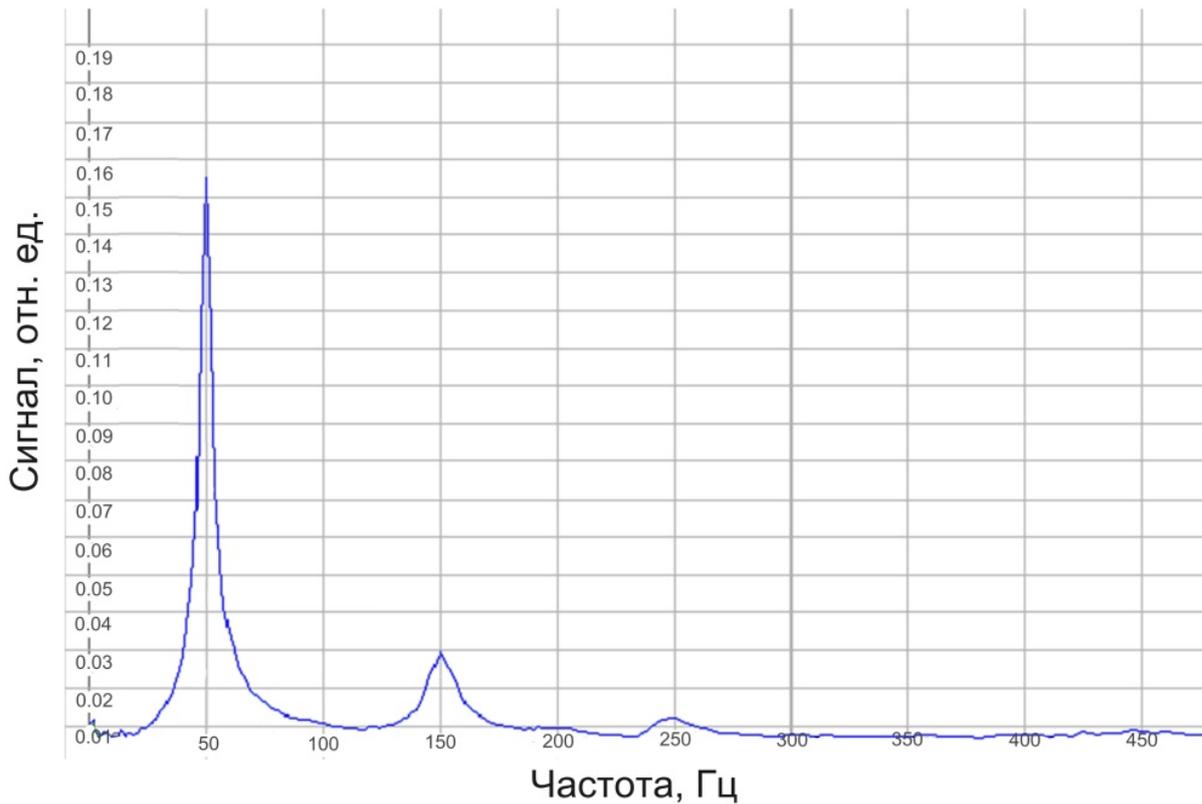


Рис. 2.5. Спектральная зависимость выходной мощности гетеродина.

тельности превышает теоретический предел в 1.5–2 раза).

Для достижения предельных значений флуктуационной чувствительности приведем следующие рассуждения. Напряжение на выходе детектора (см. рис. 2.1) для радиометра с пилот-сигналом можно представить в следующем виде:

$$U(t) = U_0 (1 + \delta U \sin(\Omega t)), \quad (2.4)$$

здесь Ω – круговая частота модуляции сигнала, U_0 – среднее значение величины сигнала, δU – глубина модуляции сигнала (этот коэффициент соответствует относительной величине полезного сигнала). Предположим, что тракт преобразования частоты обладает нестабильностью, связанной с нестабильностью питания усилителей, нестабильностью рабочей точки смесителя либо нестабильностью мощности гетеродина (последняя, как было показано выше, является превалирующим фактором), и выраженной в виде:

$$G(t) = G_0 (1 + \delta G \sin(\omega t)), \quad (2.5)$$

здесь G_0 – среднее значение коэффициента усиления, который связан с потерями преобразования смесителя и коэффициентом усиления тракта промежуточной частоты, δG – глубина модуляции коэффициента усиления нестабильностью (коэффициент δG определяет относительную величину нестабильности).

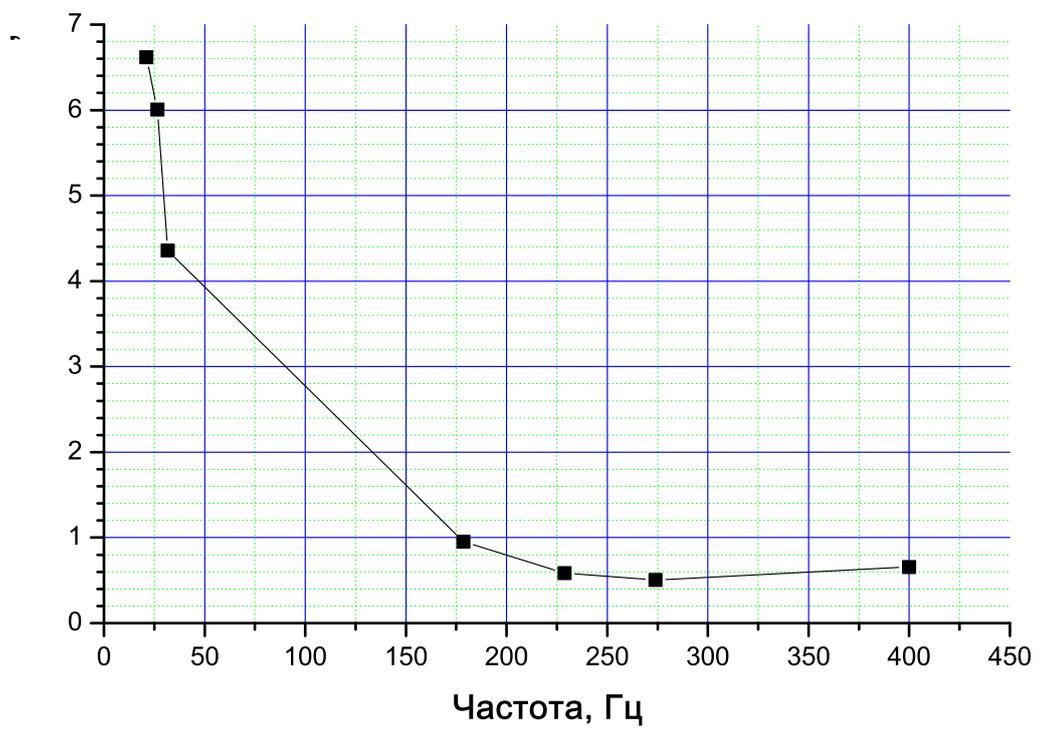


Рис. 2.6. Зависимость флуктуационной чувствительности приемника от частоты модуляции сигнала.

Выходной сигнал синхронного детектора можно записать в виде выражения:

$$U_{OUT}(t) = U(t)G(t) \sin(\Omega t). \quad (2.6)$$

Для описания реальных нестабильностей преобразования необходимо учесть непрерывность спектра $G(t)$. Раскрывая это выражение, следует также учесть действие фильтра низких частот, задающего постоянную времени синхронного детектирования. Для этого необходимо пренебречь всеми гармониками выходного сигнала, частоты которых отличны от нуля. В результате остается лишь пара гармоник:

$$U_{OUT}(t) = \frac{U_0 G_0}{2} (\delta U + \delta G_{\omega=\Omega} \sin((\omega - \Omega)t + \phi_1) + \delta U \delta G_{\omega=0} \sin(\omega t + \phi_2)). \quad (2.7)$$

В выражении 2.7 первое слагаемое, стоящее в скобках, соответствует полезному сигналу, а второе и третье слагаемые описывают влияние нестабильности коэффициента преобразования смесителя на флуктуационную чувствительность приемника. Вклад второго слагаемого существенен при частотах нестабильности близких к частоте модуляции сигнала. Вклад третьего слагаемого существенен при частотах нестабильности близких к нулю. Поскольку с увеличением частоты спектральная плотность шума δG падает, то увеличение частоты модуляции сигнала приводит к уменьшению 2-го слагаемого в выражении (2.7).

Приведенные на рис. 2.6 минимальные значения флуктуационной чувствительности превосходят предельные значения, рассчитанные по формуле (1.9). Для достижения предельных значений ΔT_H потребовался анализ третьего слагаемого, стоящего в скобках выражения (2.7). Вклад его существенен при частотах нестабильности близких к нулю, при этом величина паразитного вклада пропорциональна величине полезного сигнала δU . Следовательно, уменьшением величины полезного сигнала можно достигнуть значение предельной флуктуационной чувствительности.

Для демонстрации этого утверждения был проведен эксперимент, в котором температура нагрузки изменялась в широком диапазоне. На рис. 2.7 приведена зависимость флуктуационной чувствительности НЕВ-смесителя от величины разности физических температур нагрузки и лопастей обтюлятора. Измерения проводились при частоте модуляции 400 Гц. Из графика видно, что с уменьшением величины входного сигнала флуктуационная чувствительность приемника приближается к своему предельному значению и при разнице температур между лопастями обтюлятора и нагрузкой ниже 50 К флуктуационная чувствительность достигает своего предельного значения соответствующего расчетным выражениям.

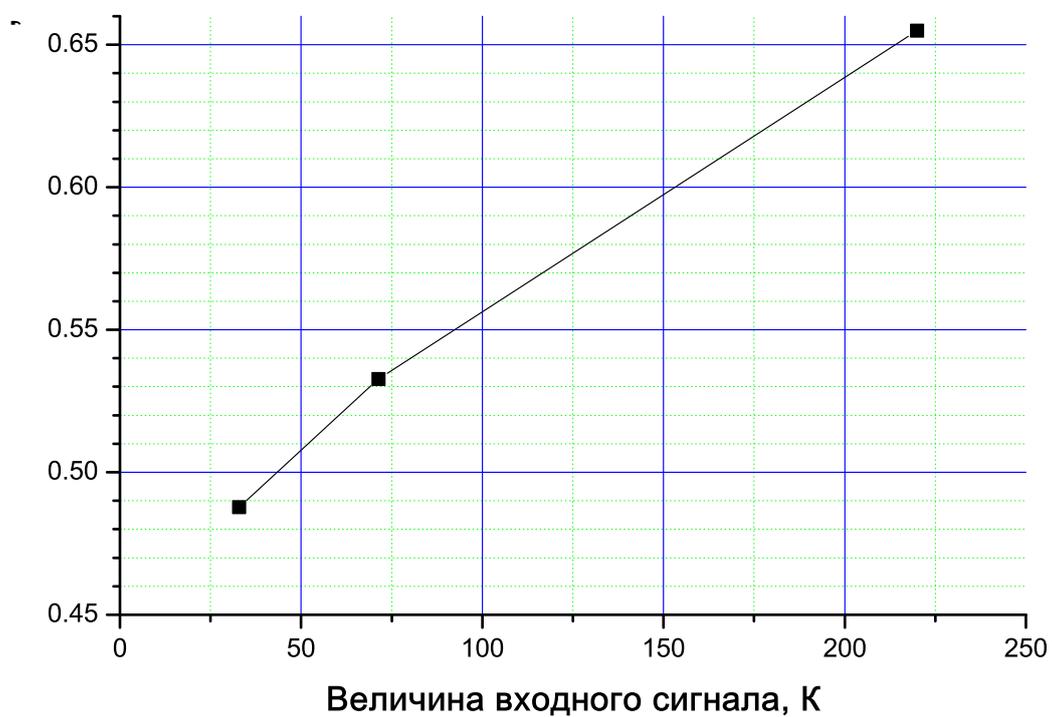


Рис. 2.7. Зависимость флуктуационной чувствительности приемника от величины входного сигнала. За величину входного сигнала принимается разность физических температур нагрузки и лопастей обтюлятора.

2.3 Изменение параметров НЕВ-смесителя в зависимости от его положения на гиперполусферической линзе

По методу построения изображений все системы радиовидения можно разделить на системы, использующие сканирующую систему с одним чувствительным элементом, и системы на основе матрицы чувствительных элементов. Основным недостатком первого подхода является низкая скорость построения изображения. Второй подход подразумевает более сложную систему согласования матрицы приемника с принимаемым излучением, а также более сложную систему питания приемника и детектирования сигнала. Прежде чем разрабатывать подобную матрицу из чувствительных элементов, было предложено провести измерения, позволяющие определить возможность использования НЕВ смесителя в качестве элемента матрицы, расположенной на плоской поверхности гиперполусферической линзы. Для проведения таких измерений нет необходимости в смесителях с рекордными характеристиками, поэтому в рамках этой работы использовались смесители с шумовой температурой много выше квантового предела для 300 ГГц. В данном параграфе обсуждается зависимость шумовых характеристик приемника и его диаграммы направленности от расположения чувствительного объекта на гиперполусферической линзе.

В рамках проведенного исследования НЕВ смеситель (Termovision#2) был включен в радиометрический тракт. Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 2.8. НЕВ-смеситель, согласованный с планарной спиральной антенной, закреплен на гиперполусферической линзе, изготовленной из высокоомного кремния. Смеситель устанавливался на плоской поверхности линзы с различным смещением относительно центра линзы, с точностью позиционирования ~ 50 мкм. При помощи адаптера смещения смеситель согласовывался с источником смещения и трактом промежуточных частот (ПЧ). Тракт ПЧ соответствовал описанному ранее в параграфе 2.1. В качестве гетеродина использовалась лампа обратной волны ОВ-30, измерения проводились на частоте гетеродина 300 ГГц. В качестве сигнального источника с изменяемой температурой использовалась нагрузка из материала ECCOSORB [104], являющаяся с хорошей степенью точности абсолютно черным телом в терагерцевом диапазоне частот. Сопряжение излучения гетеродина с излучением нагрузки и смесителем обеспечивалось майларовым делителем луча.

Для формирования диаграммы направленности использовались диафрагма в виде тонкой горизонтальной прорези в экране, расположенной у окна криостата для ограничения области видимости приемника, и плоская сигнальная нагрузка при температуре ~ 300 К, которая перемещалась в горизон-

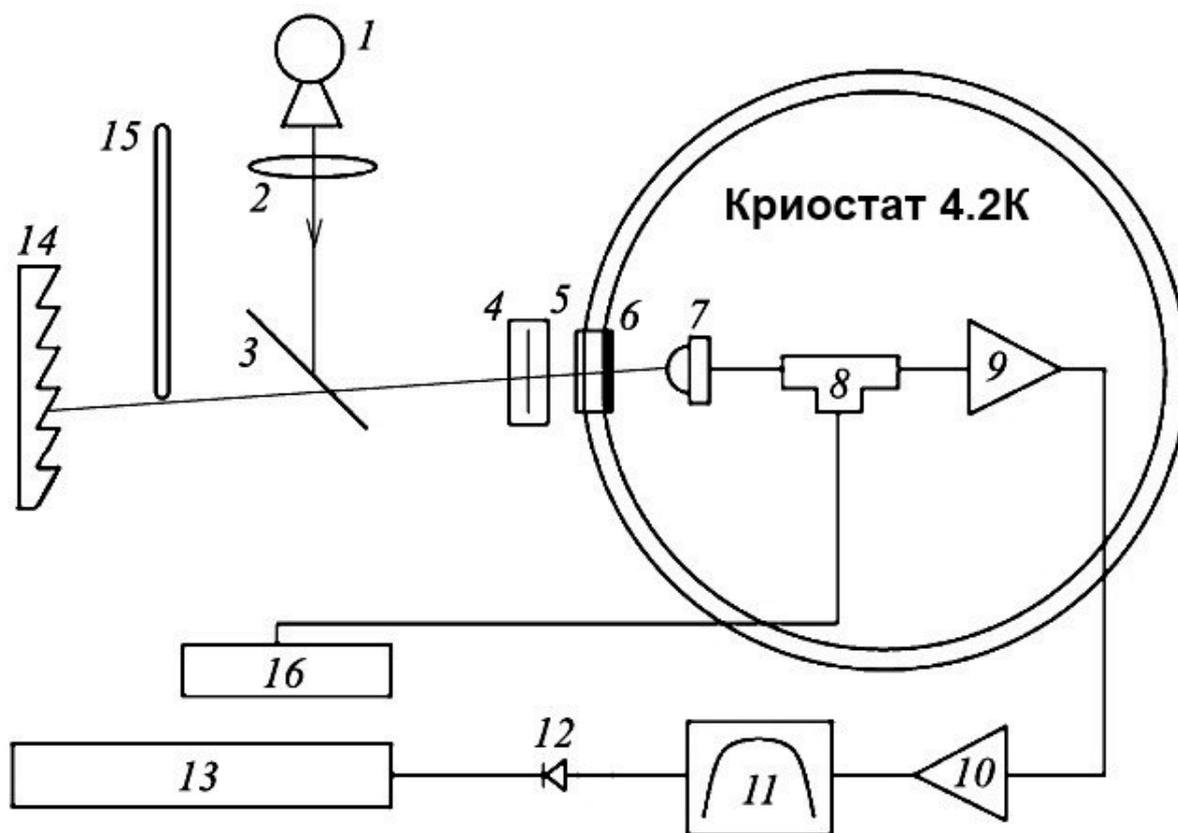


Рис. 2.8. Блок-схема лабораторной установки для определения влияния положения смесителя на гиперполусферической линзе на его шумовые характеристики. 1 — лампа обратной волны 300 ГГц; 2 — тефлоновая линза; 3 — майларовый делитель луча; 4 — диафрагма; 5 — тефлоновое окно; 6 — инфракрасный фильтр Zitex; 7 — смесительный блок; 8 — адаптер смещения; 9 — охлаждаемый усилитель ПЧ; 10 — усилитель ПЧ; 11 — полоснопропускающий фильтр; 12 — детектор; 13 — устройство сбора данных; 14 — фоновая нагрузка при 77К; 15 — сигнальная нагрузка при температуре ~ 300 К; 16 — источник напряжения смещения.

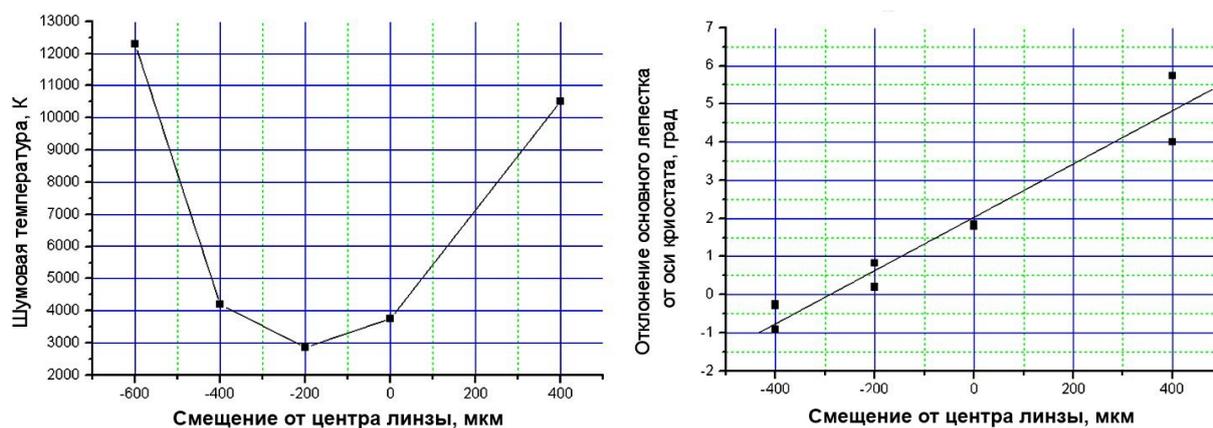


Рис. 2.9. Влияние положения смесителя на линзе на его характеристики. Слева – зависимость шумовой температуры от смещения смесителя от центра линзы (погрешность измерения шумовой температуры не превышает 10%). Справа – зависимость отклонения основного лепестка диаграммы направленности смещения смесителя от центра линзы. Не соответствие нуля смещения с нулем отклонения основного лепестка диаграммы связано с точностью выбора системы отсчета. Наибольший интерес представляет наклон аппроксимационной прямой ($\sim 0.5^\circ$ на 100 мкм), соответствующий теоретическим предсказаниям.

тальном направлении с высокой точностью, постепенно закрывая холодную фоновую нагрузку. Ширина прорези составляла 2 мм. Сигнальная нагрузка передвигалась на расстоянии ~ 580 мм от криостата. Сигнал модулировался с частотой 20 Гц и детектировался синхронным детектором EG&G Model 124A.

Была проведена серия измерений шумовой температуры приемника с одним НЕВ смесителем при различных положениях смесителя относительно центра линзы методом Y-фактора, описанным в параграфе 2.1. Как видно из рис. 2.9 шумовая температура незначительно меняется при смещении смесителя в области диаметром 400 мкм относительно оптимального положения и сильно возрастает за пределами этой области. Несимметричность графика относительно нулевого смещения может быть объяснена постоянной погрешностью, возникающей в процессе установки смесителя на линзу и вызванной несовершенством используемого при установке смесителя оптического микроскопа. Однако, эта ошибка приводила лишь к постоянному смещению смесителя относительно центра линзы, поскольку в процессе установки образца был выбран строгий алгоритм действий.

В этой же серии экспериментов были проведены измерения диаграмм направленности приемника при различных положениях смесителя относительно центра линзы. Сигнальная нагрузка комнатной температуры механически перемещалась с постоянной скоростью, постепенно перекрывая холодную фоновую нагрузку (см. рис. 2.8). При помощи компьютера записывалась зависимость мощности выходного сигнала ПЧ от положения сигнальной нагруз-

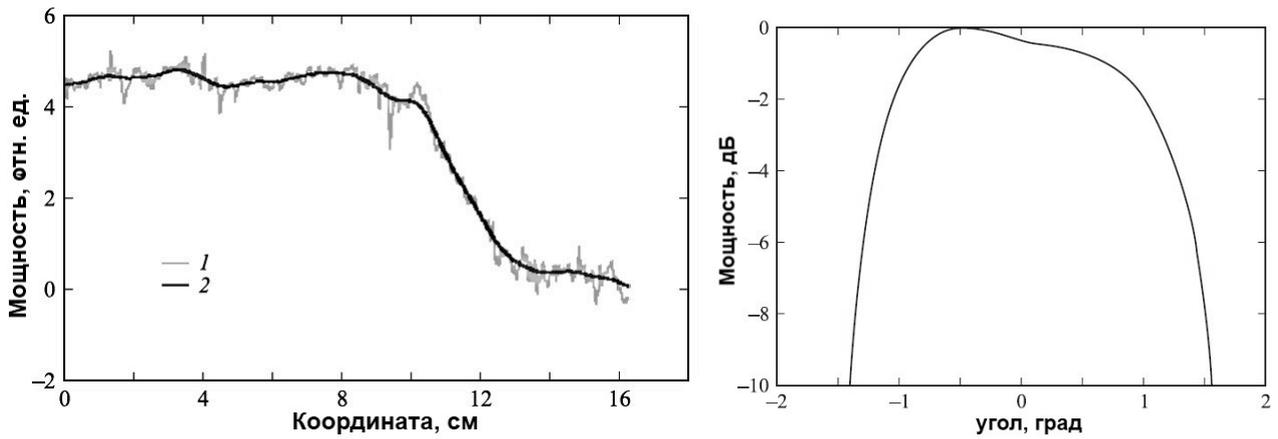


Рис. 2.10. Результаты измерения диаграммы направленности приемника. Слева – зависимость величины сигнала от положения нагретой нагрузки (1) и аппроксимация экспериментальных данных (2). Справа – типичная диаграмма направленности, получаемая в эксперименте на расстоянии 580 мм от криостата до перемещающейся нагрузки.

ки. Типичная зависимость представлена на рис. 2.10. Затем эти зависимости были продифференцированы по координате, приведены к угловым зависимостям. Типичная диаграмма направленности, полученная таким способом, представлена на рис. 2.10. При этом для диаграмм направленности при разных положениях смесителя на линзе наблюдалось отклонение основного лепестка. На рис. 2.9 представлены результаты измерений зависимости отклонения основного лепестка диаграммы направленности от смещения образца на линзе. Отклонение основного лепестка диаграммы направленности приемника подчиняется линейному закону с углом наклона $\sim 0.5^\circ$ на 100 мкм, что совпадает с теоретическим предсказанием полученным из чисто оптических соображений, используя лишь геометрические размеры линзы.

Приведенные эксперименты позволили определить область на линзе, в которой должна находиться матрица чувствительных элементов. Учитывая, что размер спиральной логопериодической антенны НЕВ смесителя, предназначенной для работы в диапазоне частот 0.2–2 ТГц, составляет около 200 мкм, то в этой области можно разместить матрицу размером 2×2 . Как видно из рис. 2.9, максимальное отклонение главного лепестка диаграммы направленности для найденной области составило примерно 2.5° при ширине основного лепестка диаграммы направленности $\sim 3^\circ$ по уровню -10 дБ. Таким образом, разместив матрицу из четырех НЕВ смесителей на гиперполусферической линзе, мы можем создать матричный приемник, позволяющий на расстоянии 20 м разрешить небольшой объект в области диаметром 15 мм без сканирующей системы.

Для практических целей 4-х пиксельного изображения конечно же недостаточно. Увеличение числа пикселей за счет увеличения диаметра линзы

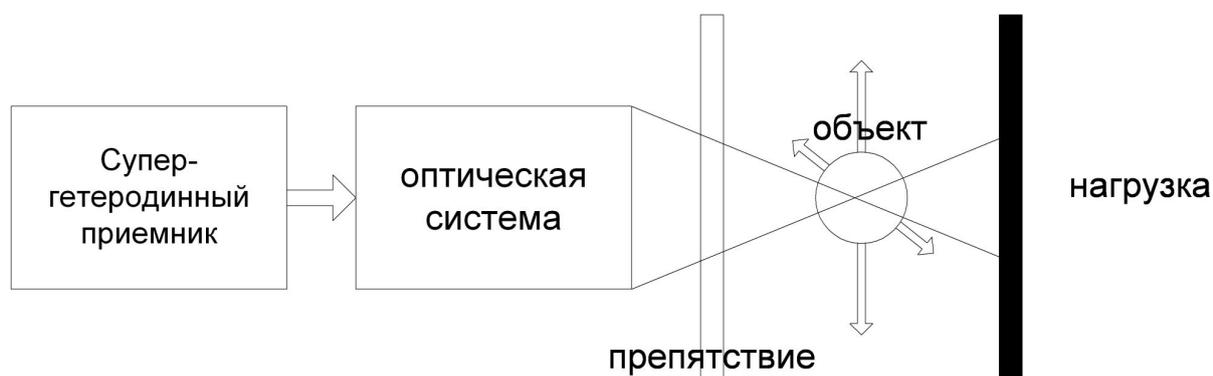


Рис. 2.11. Схематическое изображение лабораторного макета терагерцового тепловизора, предназначенного для получения терагерцовых изображений. Объект закрепляется в фокальной плоскости оптической системы. Изображение получается перемещением объекта в плоскости перпендикулярной оптической оси системы.

приводит к увеличению потерь в самой линзе, также при этом увеличивается перекрытие диаграмм направленности двух соседних смесителей, что является нежелательным фактором, поскольку количество независимых пикселей матрицы при этом уменьшается. Исходя из результатов, приведенных в данном разделе можно сделать вывод о том, что для создания системы радиовидения терагерцового диапазона частот, основанной на матричном приемнике, необходимо выполнить каждый смесительный элемент на отдельной линзе.

2.4 Получение терагерцовых изображений. Влияние препятствий на качество изображений

В рамках тестирования лабораторного макета терагерцового тепловизора делались попытки получения терагерцовых изображений за препятствиями. Для этого была собрана схема, показанная на рисунке 2.11. Изображение в такой схеме получается механическим перемещением объекта наблюдения в области перетяжки оптического объектива макета тепловизора.

В качестве простого объекта была выбрана вертикальная палочка комнатной температуры, покрытая материалом ECCOSORB [104]. Для получения контраста использовалась согласованная нагрузка с изменяемой температурой, перекрывающая поле зрения приемника и стоящая за объектом. Помимо прямого назначения (получение терагерцовых изображений), подобная схема может использоваться для настройки оптической системы в терагерцовом диапазоне частот и измерения ее параметров: ширины и глубины перетяжки оптического объектива.

Данная система также позволяет моделировать процесс обнаружения скрытых под одеждой человека предметов, особенно важного для систем безопас-

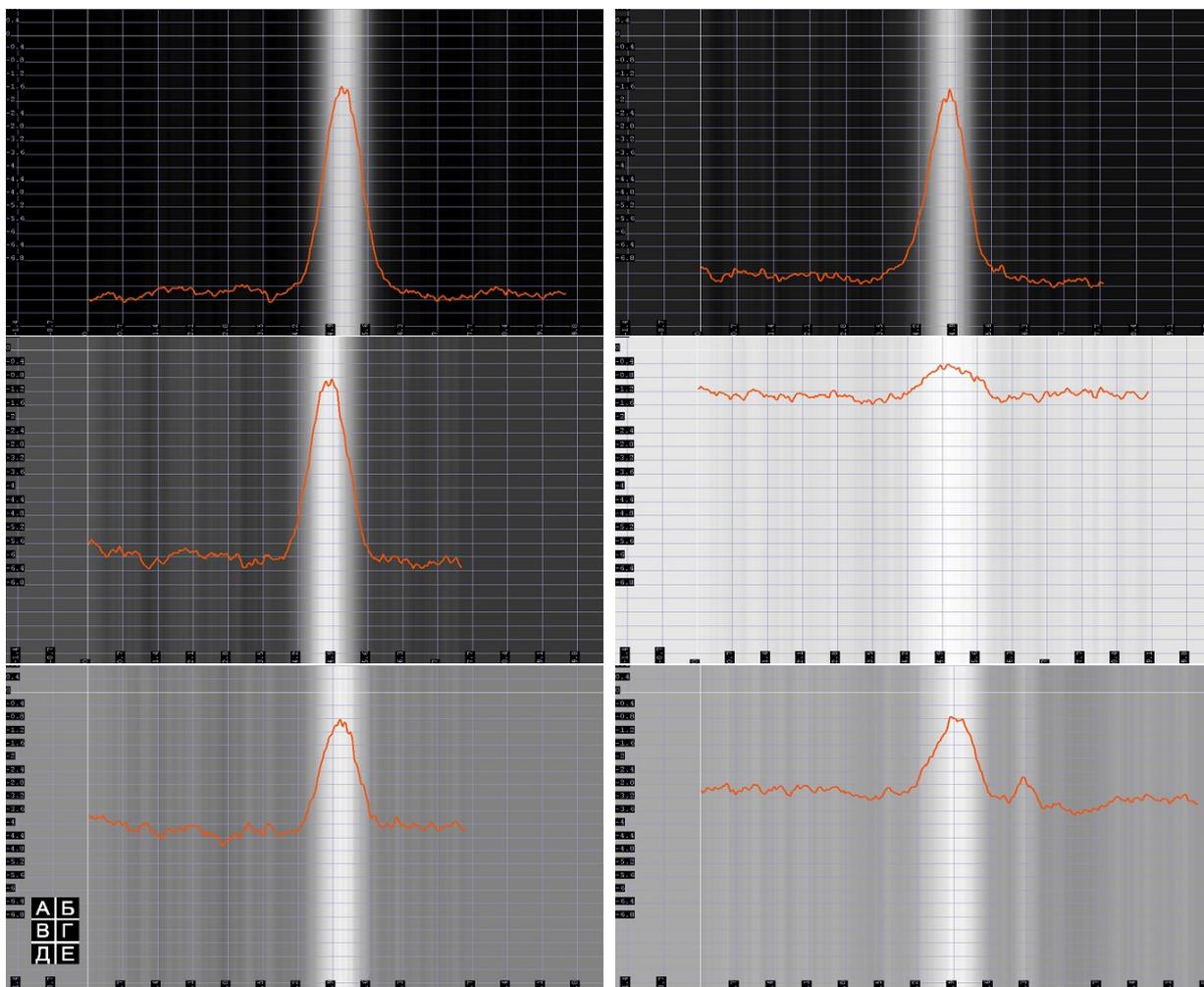


Рис. 2.12. Влияние препятствий на качество изображений. Представлены изображения вертикальной палочки, цветом в градациях серого показана радиояркость температура (для наглядности изображение представлено в инверсии, то есть более нагретые объекты соответствуют более темным областям). Линией показаны зависимости радиояркостной температуры от координаты. На рисунке А представлено изображение стержня без препятствия, Б – в качестве препятствия использовалась хлопчатобумажная ткань с потерями ~ 0.3 dB в рабочем диапазоне частот, В – препятствие из пластика толщиной 3 мм с потерями ~ 1.1 dB, Г – фанера толщиной 3 мм с потерями ~ 7.5 dB, Д – картон переплетный (потери ~ 2.7 dB), Е – фарфор толщиной 3 мм (потери ~ 4.1 dB).

ности. Для этого температура фона должна соответствовать температуре тела человека, а перед объектом необходимо поместить препятствие моделирующее одежду, или другие возможные помехи. На рисунке 2.12 представлены терагерцовые изображения, полученные на частоте 300 ГГц, абсолютно черного тела, выполненного в виде вертикальной палочки за различными препятствиями. В качестве препятствий были выбраны хлопчатобумажная ткань, пластик, фанера, картон и фарфор. Из представленных изображений видно, что хлопчатобумажная ткань не представляет преграду для получения качественного изображения. Фанера является существенным препятствием для получения изображений, в противовес пластику.

Можно ввести критерий оценки возможности получения качественного изображения за препятствием. В условиях помещения разность между температурой тела человека и температурой комнаты составляет $\sim 14 - 16$ К (максимальный контраст получаемых изображений будет соответствовать именно этой температуре). В этом случае, при флуктуационной чувствительности 0.1 К, возможно получение качественного изображения в пассивном режиме за препятствиями с коэффициентом поглощения $L \simeq 22$ дВ. В случае использования более чувствительного приемника с флуктуационной чувствительностью до 10 мК качественное изображение можно получить и за более серьезными препятствиями с поглощением до 32 дВ.

Исследование спектральных зависимостей пропускания различных материалов позволило определить границы частотного диапазона работы пассивных тепловизоров терагерцового диапазона частот. При выполнении работы были измерены коэффициенты пропускания различных диэлектрических материалов. Основное внимание было уделено измерению электрических свойств тканей и материалов, применяющихся при пошиве одежды. Эти исследования необходимы для определения возможности применения тепловизора в инспекционных и охранных системах для обнаружения различных предметов под одеждой на фоне теплового излучения человеческого тела. Измерения проводились в диапазоне длин волн от 150–300 ГГц.

На рисунке 2.13 для примера показаны зависимости пропускания материалов, применяющихся для изготовления верхней одежды: плотная шерстяная ткань, драп различной текстуры и драп с утеплителем. Измерения показали, что данные материалы обладают высокой прозрачностью в диапазоне частот от 150 ГГц до 300 ГГц независимо от плотности и толщины. При этом ход зависимостей пропускания от частота может быть аппроксимирован прямой. Периодическая составляющая может быть связана с переотражением излучения от поверхностей материала и последующей интерференцией.

На рисунке 2.14 представлен спектр пропускания деревянных брусков (бук) различной толщины. Измерения показывают, что на частотах выше 160 ГГц наблюдается сильное поглощение излучения (для толщины 7 мм).

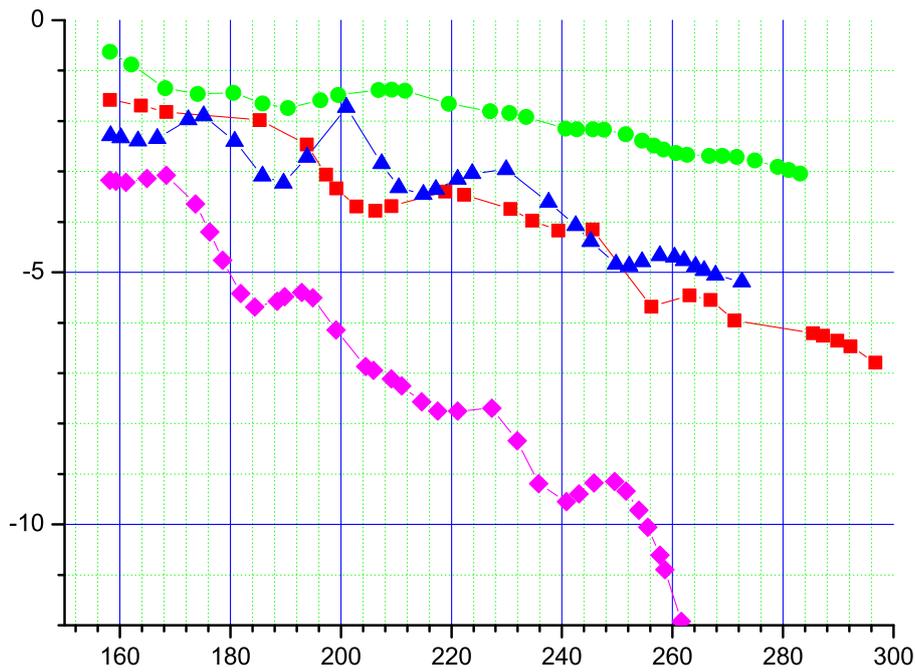


Рис. 2.13. Зависимости коэффициентов пропускания от частоты для материалов, применяющихся при изготовлении верхней одежды. На рисунке приведены экспериментальные данные: красными квадратами показаны значения коэффициентов пропускания для драп с уплотненной структурой толщиной 1.7 мм, зелеными кружками приведены значения для драпа с ватином, синими треугольниками – для драпа с неуплотненной структурой, фиолетовыми ромбами – для шерстяной ткани толщиной 1.2 мм.

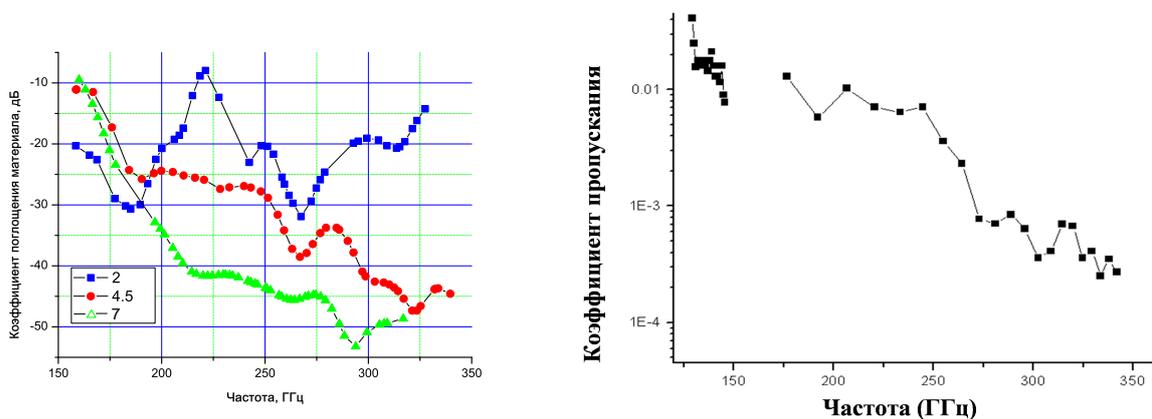


Рис. 2.14. Спектры пропускания некоторых органических материалов: слева представлены спектры пропускания деревянных брусков (бук) различной толщины, справа - мыло толщиной 10 мм.

При малой толщине доски (2 мм) неравномерность спектра пропускания обусловлена интерференцией волн, отраженных от поверхностей деревянного бруска. Спектр пропускания другого органического вещества - куски мыла также показан на рисунке 2.14. Высокое поглощение этих материалов в рабочем диапазоне частот делает их заметными на фоне теплового излучения человеческого тела. Препятствие из дерева (например стена деревянного дома или перегородка внутри помещения) при этом является практически непроницаемой для пассивного терагерцового тепловизора, и для обнаружения людей в этом случае необходимо использовать активные методики. При проектировании помещений, в которых будет проводиться использование терагерцовых тепловизоров, необходимо в качестве внутренних перегородок использовать прозрачные материалы (например, пластик, см. рис. 2.12), а для экранировки внешних излучений непрозрачные материалы (например, дерево, см. рис. 2.14).

Проведённые измерения пропускания материалов соответствуют результатам, полученными другими авторами [54] (см. рис. 1.2) и демонстрируют работоспособность терагерцового тепловизора и перспективность создания на его основе инспекционных систем контроля человека для определения скрытых под одеждой опасных предметов: взрывчатки, холодного и огнестрельного оружия.

Для демонстрации возможности построения изображения сложных объектов был использован тестовый объект "звезда". Его изображение на частоте 300 ГГц представлено на рисунке 2.15. Изображение получено механическим перемещением объекта наблюдения в вертикальной плоскости. Для получения изображения использовалась лабораторная установка, схематически показанная на рисунке 2.11. Приведенное изображение обладает достаточно плохим качеством, что связано прежде всего с проявлениями явления интерференции, а также переотражения излучения гетеродина от стен и других объектов, находящихся в помещении. Для устранения этого эффекта необходимо добиваться более качественного согласования гетеродина со смесителем, стоит учесть, что даже малая утечка излучения гетеродина приводит к существенному искажению изображения. Такое проникновение мощности гетеродина в тракт сигнала возможно например при отражении излучения гетеродина от поверхности кремниевой линзы и металлических частей антенны. Подобные же эффекты наблюдались и в работе [67], что приводило к существенному искажению изображения вплоть до невозможности определить форму объекта (см. рис. 1.11). Появление подобного дефекта можно избежать в приемниках, в которых гетеродин расположен на одном чипе со смесителем, Примером такого приемника является сверхпроводящий интегральный приемник, более подробно рассматриваемый в главе 3.

Для выработки критериев к времени получения кадра изображения пред-

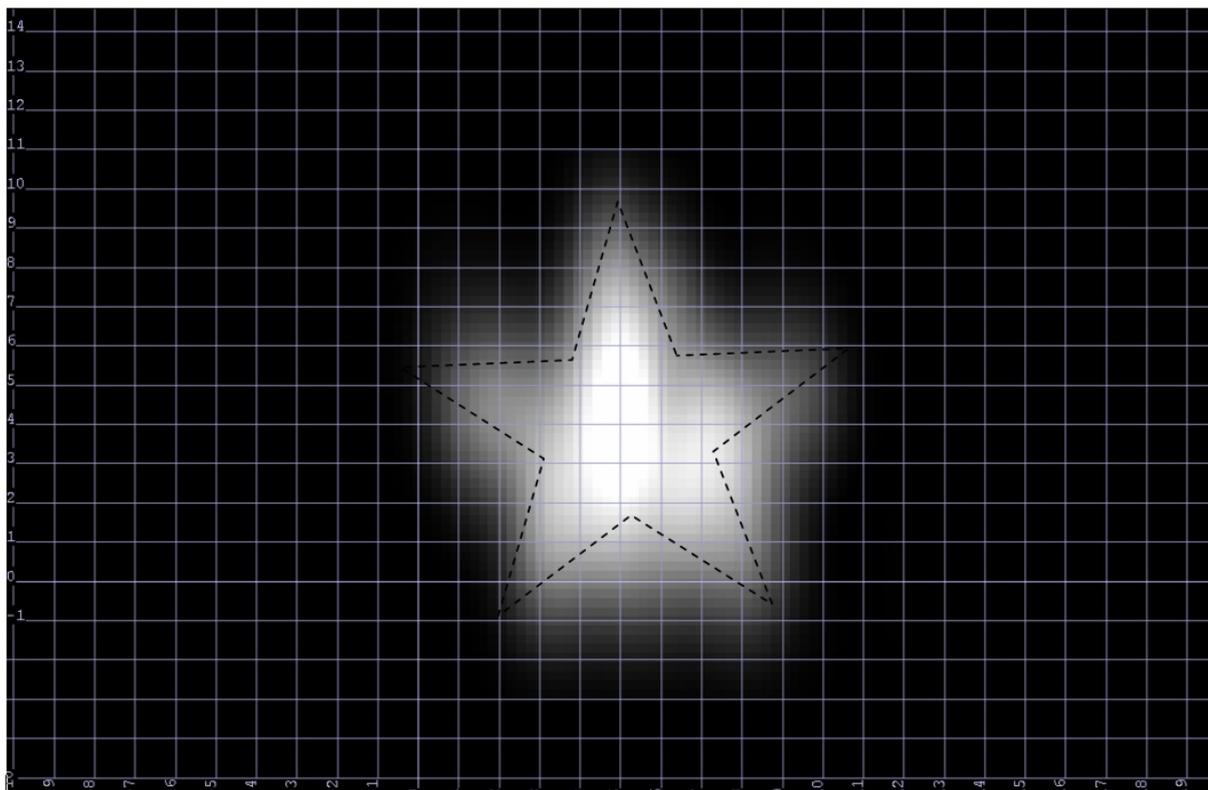


Рис. 2.15. Терагерцовое изображение тестового объекта "звезда", выполненное на частоте 300 ГГц. Сетка представленная на рисунке соответствует разбиению плоскости изображения с шагом 1 см, пунктиром представлены контуры самого объекта.

положим, что пространственное разрешение системы составляет величину Δx в плоскости объекта. При полном размере кадра $X \times Y$ существует $XY/\Delta x^2$ независимых точек кадра. Пусть необходимо получать изображение с флуктуационной чувствительностью ΔT_H , соответствующей постоянной времени τ . Тогда наиболее простым критерием времени получения кадра является выражение $t = XY\tau/\Delta x^2$.

Используя приведенное выражение можно в ряде случаев оптимизировать время получения кадра. Например, для объектов с высоким температурным контрастом можно уменьшить время получения кадра за счет уменьшения постоянной времени, далее области изображения с малым контрастом могут быть дополнительно более тщательно изучены с лучшей чувствительностью. Другим вариантом ускорения получения изображений является ухудшение пространственного разрешения системы за счет снижения числа пикселей кадра.

Учитывая тот факт, что $\Delta T_H \sim \tau^{-0.5}$ (см. выражение 1.9), при фиксированном времени получения кадра можно улучшить флуктуационную чувствительность изображения за счет снижения пространственного разрешения уже полученного изображения. Добиться этого можно используя цифровые методы обработки изображений: например можно использовать пространственный фильтр нижних частот с частотой отсечки F_c , при этом $\Delta T_H \sim F_c^{-1}$, также можно использовать адаптивные методы фильтрации изображения кадра (например медианный, среднеарифметический, среднегеометрический фильтры, фильтр уменьшения шума и т.д.) [108].

Улучшение резкости изображения можно добиться применением алгоритмов сверхразрешения [19, 27, 37, 109]. Стоит однако учитывать, что все существующие алгоритмы сверхразрешения используют информацию о шумах и апертурную функцию оптической системы и неверное задание параметров приводит к существенному искажению изображения. Применение алгоритмов сверхразрешения к терагерцовым изображениям рассмотрено в параграфе 3.5.

Итак, суммируя все выше сказанное, можно сказать, что

$$t\Delta x^2 = XY\tau, \quad \text{или} \quad t\Delta x^2\Delta T_H^2 = \text{Const.} \quad (2.8)$$

Предположим, что размер кадра составляет 100×100 пикселей, при времени кадра $t \simeq 3$ с, что соответствует принятому стандарту при использовании веб-камер, τ должно быть не большим, чем 300 мкс, чтобы все точки были независимыми. Последнее накладывает существенные ограничения на возможность различить объекты с малым контрастом радиоярких температур.

Для практического использования можно предложить алгоритм с неравномерным шагом между пикселями изображения. Алгоритм этот включает

ся в следующем: на первом шаге информация принимается с малого количества точек объектной плоскости (например кадр с размерами 10×10). После чего на втором шаге выделяются интересные места кадра, например соответствующие температуре тела человека, которые далее рассматриваются более подробно. При обнаружении скрытых под одеждой человека предметов, производится более тщательное сканирование областей местоположения этих предметов с целью определения формы и состава предмета. При необходимости можно продолжить более тщательное разбиение кадра.

Стоит заметить, что реализация подобного алгоритма на практике требует создания быстрой сканирующей системы с возможностью установки произвольного положения сканера, при этом необходим также блок цифровой обработки информации, работающий в реальном времени, синхронизированный с управляющими сигналами сканера.

2.5 Выводы к главе

В настоящей главе продемонстрирован простой способ достижения предельных флуктуационных характеристик, заключающийся в уходе от нежелательных флуктуаций за счет увеличения частоты модуляции и снижения величины входного сигнала. Достигнуто предельное значение флуктуационной чувствительности для НЕВ смесителя, которое составило 0.45 К на частоте $\sim 300 \text{ ГГц}$ при постоянной времени 1 с , ширине полосы промежуточных частот 200 МГц и шумовой температуре приемника $\sim 2000 \text{ К}$.

Получены ограничения на размер матричного приемника, расположенного на одной линзе. При увеличении числа приемников матрицы более чем 2×2 будет наблюдаться снижение чувствительности приемников и перекрытие диаграмм направленностей отдельных пикселей матрицы.

Получены некоторые изображения простых объектов в терагерцевом диапазоне частот и выявлен критерий возможности получения изображений за препятствиями. При использовании приемника с флуктуационной чувствительностью $\sim 10 \text{ мК}$ предельно допустимое значение потерь составляет 32 дБ . В диапазоне частот до 300 ГГц материалы, из которых изготавливается одежда, удовлетворяют этому условию, что еще раз показывает возможность использования пассивного терагерцевого тепловидения для обнаружения скрытых под одеждой предметов, таких как взрывчатые и наркотические вещества.

Глава 3

Сверхпроводниковый интегральный приемник

Одним из уникальных объектов физики сверхпроводимости является туннельный переход сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник. Опираясь на его свойства, возможно создание как приемников так и высокостабильных генераторов терагерцового диапазона частот. Развитие этих устройств позволило к настоящему времени создавать интегральные супергетеродинные приемники, объединяющие в себе и малошумящий смеситель терагерцового диапазона частот и высокостабильный гетеродин. В настоящей главе изложены результаты исследования сверхпроводниковых интегральных приемников (СИП) в пассивных системах радиовидения терагерцового диапазона частот. В ходе работы был разработан и создан лабораторный макет тепловизора на базе СИП, определены его основные характеристики, а также сформулированы необходимые условия достижения предельной флуктуационной чувствительности и высокой временной стабильности приемника. Основные результаты главы были опубликованы в работах [110–114].

3.1 Сверхпроводниковый интегральный приемник

В настоящее время для приема терагерцового излучения активно развиваются ряд конкурирующих друг с другом технологий. Каждая из них обладает как преимуществами, так и недостатками. Среди супергетеродинных приемников терагерцового диапазона частот наиболее продвинутыми являются смесители на диодах с барьером Шоттки, смесители на эффекте электронного разогрева в сверхпроводниках, а также СИС смесители, являющиеся в настоящее время наиболее чувствительными когерентными приемниками в диапазоне частот 100–1500 ГГц. Основопологающей работой, описывающей свой-

ства туннельных структур сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник, является теоретическая работа Джозефсона [115], в которой автор предсказывает уникальные свойства таких структур. Помимо эффектов Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах наблюдается очень сильная квазичастичная нелинейность вольтамперной характеристики, позволяющая создать гетеродинный приемник, работающий с усилением, шумы которого будут ограничены лишь квантовым шумом. Рабочий диапазон частот СИС смесителя снизу ограничен шириной размытия энергетической щели сверхпроводников, связанной с температурными флуктуациями, из которых изготовлены сверхпроводящие контакты структуры, а сверху суммой величин энергетических щелей сверхпроводников. Так, например, для СИС смесителя изготовленного по технологии NbN/Al-AlN_x/NbN величина размытия энергетической щели составляет ~ 150 мкэВ при сумме величин энергетических щелей ~ 4.6–4.7 мэВ. Представленные значения и определяют рабочий диапазон частот приемника (80–2200 ГГц).

Помимо этого, использование туннельных СИС переходов позволяет создавать источники высокочастотного тока. Существует два несколько отличающихся друг от друга подхода к решению этой проблемы. Одним из таких подходов является использование нестационарного эффекта Джозефсона в туннельных структурах. Для использования этого метода в практических целях в качестве генератора требуются существенные величины выходного высокочастотного тока, что возможно лишь при использовании большого числа туннельных переходов, синхронизированных друг с другом. Задача эта является достаточно сложной и в настоящее время не имеется практически используемых устройств, использующих этот подход.

Другой подход к созданию терагерцового источника сигнала заключается в использовании джозефсоновских структур с распределенным туннельным переходом. В таких структурах для возникновения ВЧ тока используется вязкое течение джозефсоновских вихрей, каждый из которых окружен экранирующим током. В момент прихода такого вихря к концу туннельного перехода возникает импульс тока в передающей линии. Управление частотой и величиной возникающего ВЧ тока осуществляется за счет управления скоростью течения и плотностью вихрей через изменение величины магнитного поля, пронизывающего туннельный переход, и постоянного напряжения смещения, приложенного к сверхпроводящим контактам туннельного перехода. В настоящее время на этом эффекте создан генератор на вязком течении джозефсоновских вихрей (в англоязычной терминологии генератор на вязком течении джозефсоновских вихрей принято называть FFO – flux flow oscillator), обладающий приемлемыми характеристиками для создания интегрального супергетеродинного приемника [47–50].

Впервые попытка создания микрочипа с интегрированным в нем СИС

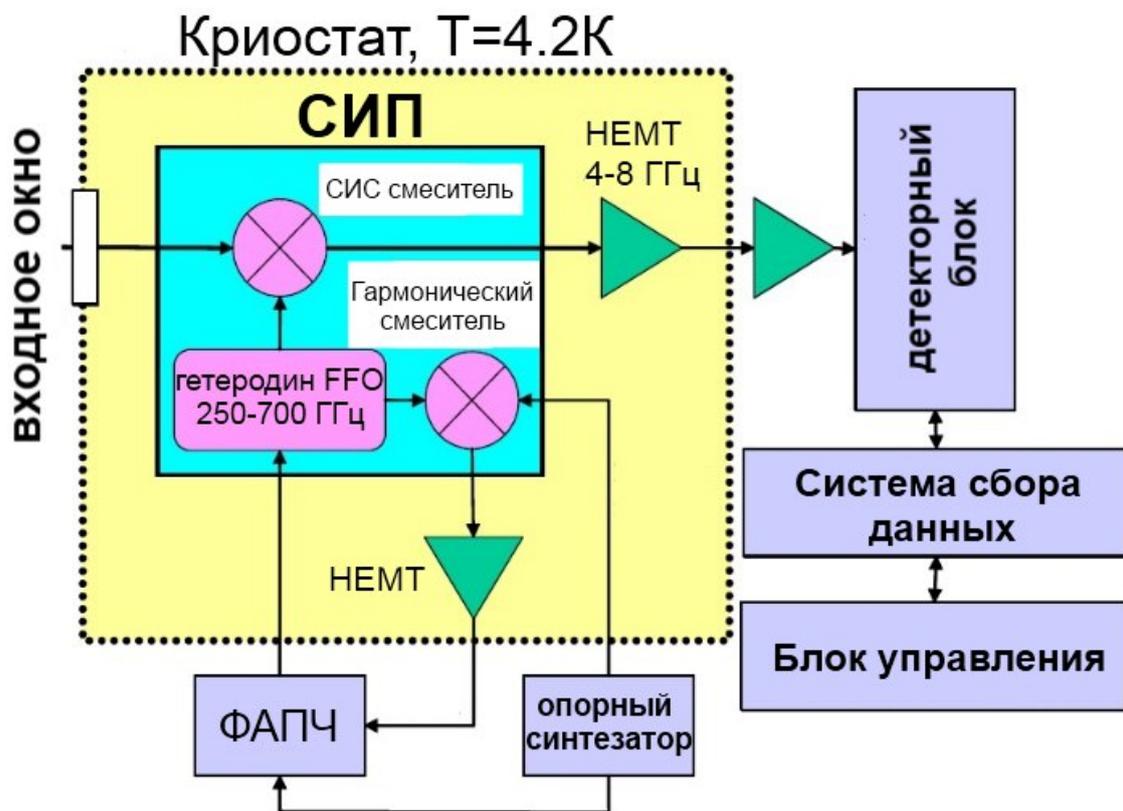


Рис. 3.1. Блок-схема сверхпроводящего интегрального приемника. Для полного использования всех возможностей СИП необходимы также опорный синтезатор и система фазовой автоподстройки частоты [116].

смесителем и сверхпроводниковым генератором гетеродина была сделана в работе [93]. В настоящее время сверхпроводящий интегральный приемник (СИП), активно развиваемый в ИРЭ РАН, представляет собой чип размерами $4 \times 4 \times 0.5 \text{ мм}^3$ с изготовленными на нем СИС смесителем, сопряженным с квазиоптической планарной антенной, сверхпроводящим гетеродином и гармоническим смесителем, предназначенным для реализации режима фазовой автоподстройки частоты гетеродина. Гармонический смеситель изготавливается по той же технологии что и СИС смеситель приемника. Схематически СИП изображен на рис. 3.1 [116]. Внешний вид чипа сверхпроводящего интегрального приемника представлен на рис. 3.2.

Поскольку выходной импеданс FFO существенно отличается от входных импедансов СИС смесителя и гармонического смесителя, для согласования элементов схемы необходимо использование ВЧ трансформаторов импеданса. ВЧ мощность передается от FFO к СИС смесителю и гармоническому смесителю при помощи сверхпроводящих микрополосковых линий. Эксперименты показывают, что в СИП достигается хорошее согласование между FFO и СИС смесителем, обеспечивающее необходимый уровень накачки смесителя

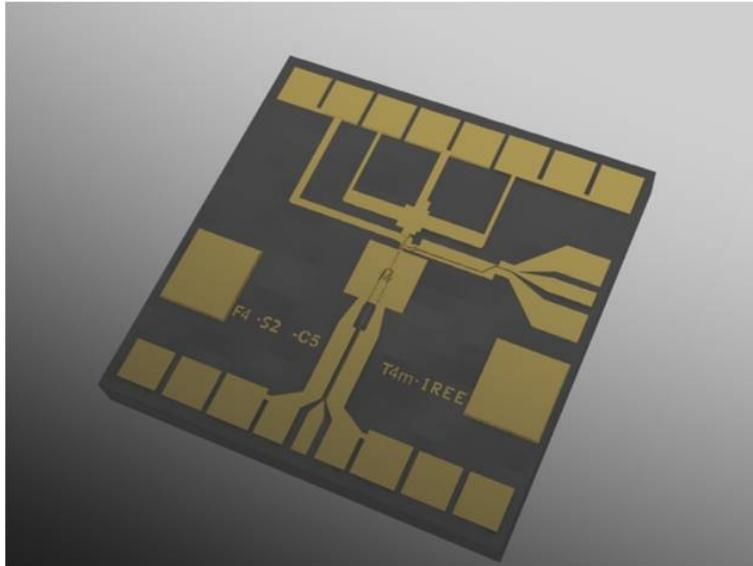


Рис. 3.2. Внешний вид сипа сверхпроводящего интегрального приемника.

в широком диапазоне частот (200–700 ГГц).

Для подавления нежелательных шумов, причиной которых может служить нестационарный эффект Джозефсона, а также для изменения режима работы гетеродина используются специальные контрольные линии. Постоянный ток, протекающий по контрольной линии задает величину магнитного поля, пронизывающего туннельный переход СИС смесителя и FFO. В целом, для работы СИП в качестве полнофункционального спектрометра необходимы лишь постоянные напряжения, которые можно получить, используя батареи постоянного тока, при этом частота генерации FFO пропорциональна напряжению, приложенного к туннельному переходу структуры (коэффициент пропорциональности $f/U = 2e/h = 482.6$ ГГц/мВ).

Несмотря на широкий частотный диапазон, в котором осуществляется согласование FFO со смесителем, рабочий диапазон интегрального приёмника определяется качеством согласования смесителя с приемной антенной, в качестве которой используется либо двухщелевая антенна, либо двойной диполь. В настоящее время лучшими результатами по шумовым характеристикам таких приемников являются $T_R < 100$ К в полосе частот 500–650 ГГц. Типичный вид зависимости шумовой температуры представлен на рисунке 3.3 [117]. Увеличение шумовой температуры вблизи частоты 560 ГГц связано с наличием линии поглощения воды, содержащейся в атмосфере. Наличие этой линии приводит к ухудшению результатов в лабораторных условиях, но стоит отметить, что при использовании приемника в качестве приемного элемента телескопа орбитального базирования ухудшение чувствительности приемника вблизи линий поглощения воды не будет проявляться.

Несмотря на то, что шумовые характеристики СИП несколько уступают

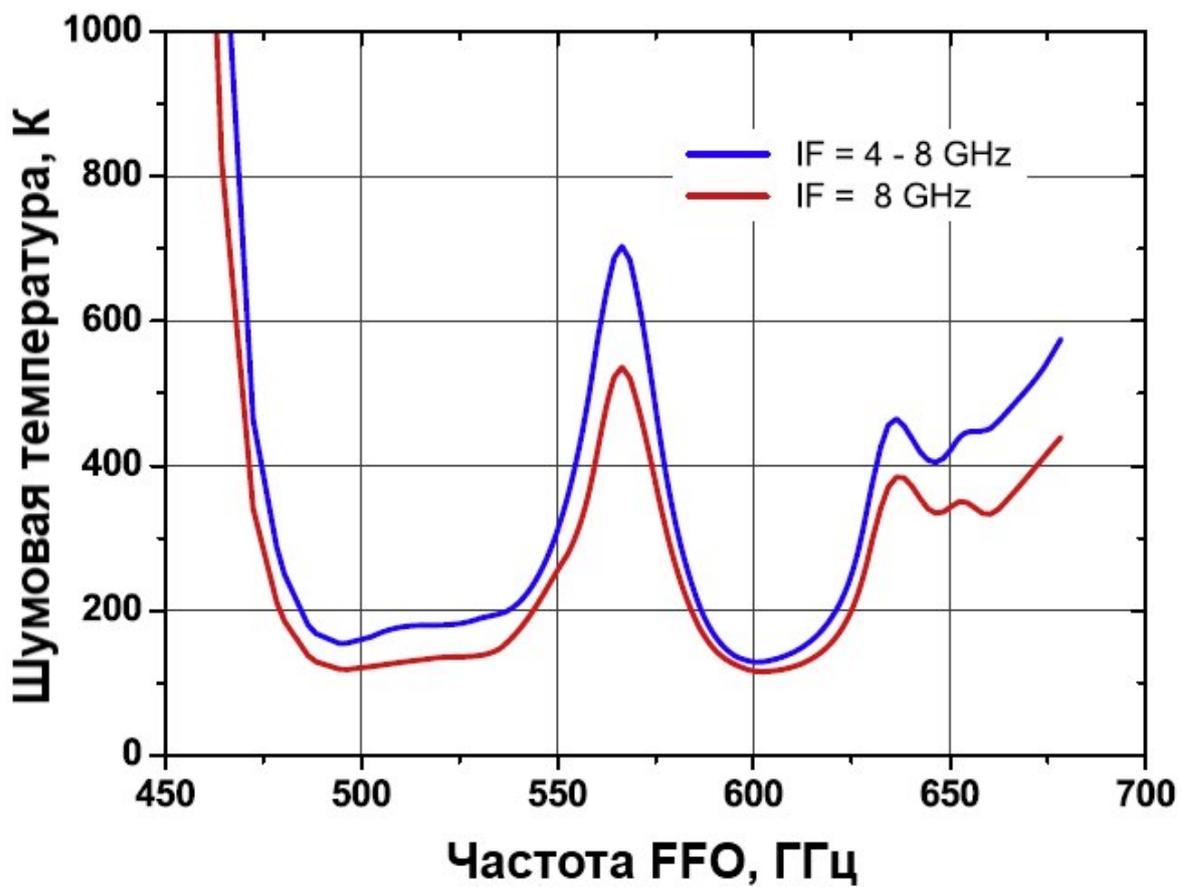


Рис. 3.3. Зависимость шумовой температуры СИП от частоты генерации гетеродина [117].

одиноким СИС смесителям, не использующих интегральных схем, использование СИП становится очень привлекательным при создании компактных спектрометров. Компактность приемника играет также важную роль при создании систем радиовидения. В предыдущей главе был продемонстрирован пример работы супергетеродинного приемника со смесителем на горячих электронах в качестве приемного элемента лабораторного макета тепловизора терагерцового диапазона частот. Продемонстрированная система должна быть снабжена внешним гетеродином. Использование даже сравнительно небольших по размерам твердотельных генераторов с умножителем существенно увеличивают габариты системы и делают ее мало привлекательной для использования в практических системах радиовидения терагерцового диапазона частот.

В ходе работы над диссертационным исследованием на базе СИП был создан лабораторный макет терагерцового тепловизора. В качестве основных характеристик приемной системы, на которых было сосредоточено особое внимание, были выбраны флуктуационная чувствительность и временная стабильность приемника.

3.2 Описание методики проведения эксперимента

Представленная на рис. 3.1 блок-схема сверхпроводящего интегрального приемника использует фазовую автоподстройку частоты гетеродина (ФАПЧ). В работе использовались два режима работы СИП. Для получения предельных значений флуктуационной чувствительности использовалась ФАПЧ (такие измерения проводились в ИРЭ РАН). При построении терагерцовых изображений хороший контраст изображения можно достичь за счет увеличения времени накопления сигнала, поэтому эти измерения не нуждались в использовании достаточно сложной техники ФАПЧ (измерения такого рода проводились в УНРЦ МПГУ).

Блок схема лабораторной установки, предназначенной для изучения флуктуационных характеристик СИП представлена на рис. 3.4. Чип интегрального приемника приклеивался к гиперполусферической линзе, изготовленной из высокорезистивного кремния. Затем линза с СИП закреплялась в специальном держателе, крепящемся на холодной плате вакуумного объема оптического гелиевого криостата производства компании Infrared Laboratories. При помощи ультразвуковой сварки СИП соединялся с платой сопряжения, на которой были выполнены все необходимые согласующие и развязывающие элементы (адаптеры смещения СИС смесителя и гармонического смесителя, микрополосковые 50-омные линии, согласованные с ВЧ разъемами типа

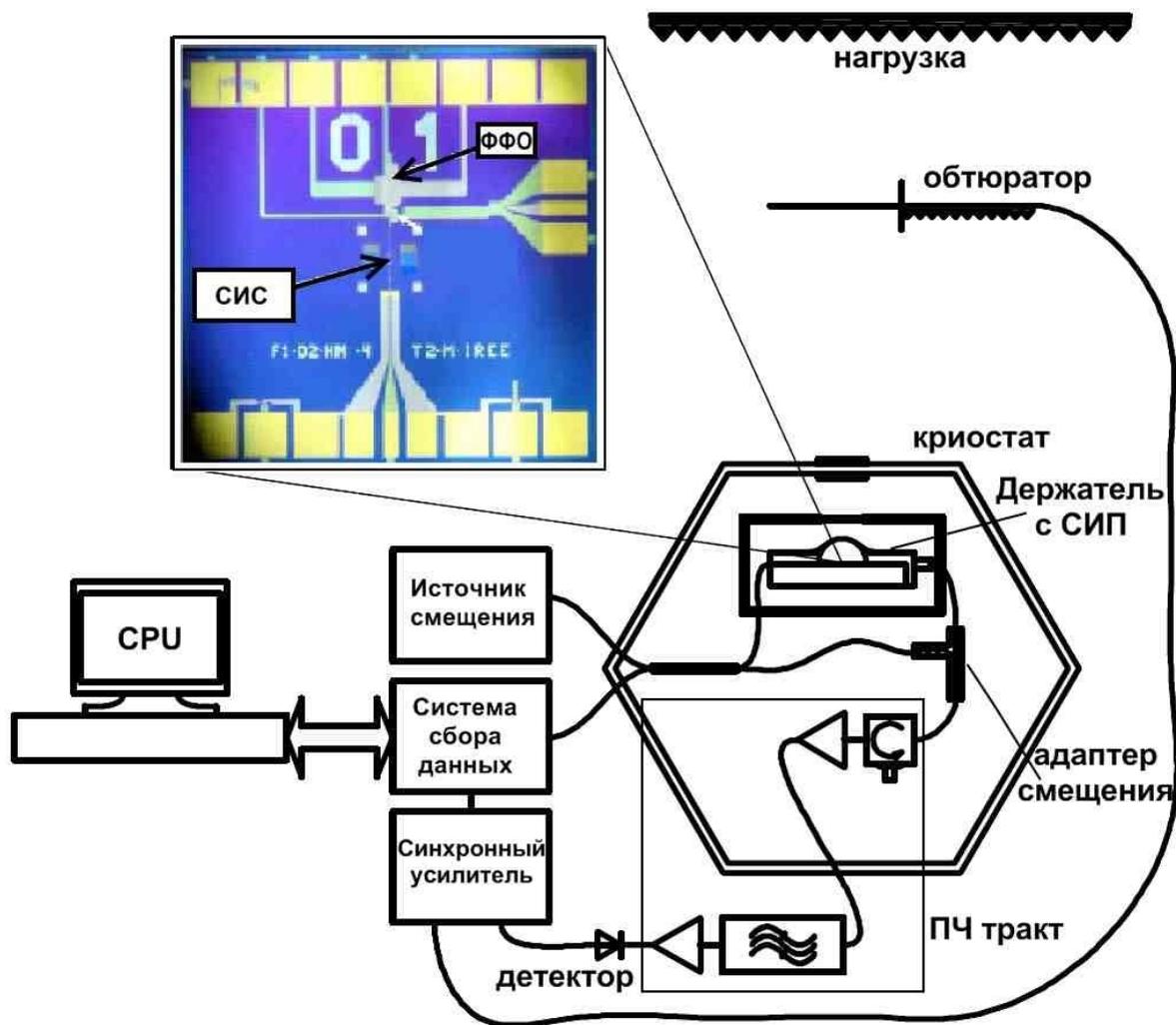


Рис. 3.4. Блок схема лабораторной установки, предназначенной для изучения флуктуационных характеристик СИП.

SMA и т.д.). Также на плате сопряжения располагались разъемы постоянного напряжения, при помощи которых к элементам микросхемы подводилось смещение от источников питания.

Сам держатель помещался в магнитный экран, который также крепился к холодной плате криостата. Используемый магнитный экран был двухслойным: внешний слой был выполнен из криопермаллоя, а внутренний из сверхпроводящего свинца. Основное назначение экрана заключается в экранировке внешних магнитных полей, влияние которых может привести к деградации характеристик FFO, и, как следствие, ухудшению характеристик всего СИП. В случае, если при захолаживании приемника FFO захватывал некоторое количество квантов потока магнитного поля, СИП можно было отогреть до температуры выше критической температуры сверхпроводимости при помощи резистора с подведенным к нему постоянным напряжением, установленным на держателе СИП. Магнитный экран дополнительно являлся радиационным экраном приемника, уменьшающим теплообмен держателя СИП с комнатой и стенками криостата за счет излучения.

Сигнал промежуточной частоты поступал на широкополосный малошумящий охлаждаемый усилитель (с шумовой температурой ~ 4 К) и затем на усилительный тракт ПЧ комнатной температуры. В эксперименте использовались два набора усилителей ПЧ: первый обладал полосой усиления 1.4–1.6 ГГц (формирование полосы усиления производилось при помощи полосно-пропускающего фильтра), второй — 4–8 ГГц. В обоих случаях коэффициент усиления тракта ПЧ составлял ~ 65 –70 дБ. При использовании фазовой автоподстройки частоты дополнительно использовался охлаждаемый усилитель, работающий в частотном диапазоне до 1 ГГц, предназначенный для усиления сигнала промежуточной частоты с выхода гармонического смесителя.

В качестве входного окна использовался тефлон, обладающий хорошими пропускающими свойствами в диапазоне частот до 1 ТГц, на радиационном экране криостата с температурой 77 К также устанавливался оптический фильтр, изготовленный из материала Zitex G104. Данный материал по сути является пористым тефлоном и обладает схожими с входным окном характеристиками пропускания [118, 119].

Для определения флуктуационных характеристик приемника в качестве сигнала использовалось тепловое излучение нагрузки, выполненной из материала ECCOSORB, который в рабочем диапазоне частот приемника в хорошем приближении является абсолютно черным телом. Яркостная температур нагрузки могла изменяться в диапазоне 77–300 К. Сигнал модулировался обтюратором, лопасти которого были также покрыты материалом ECCOSORB комнатной температуры.

Выходная мощность тракта ПЧ детектировалась быстродействующим детектором и далее при помощи синхронного с частотой обтюратора детекти-

рования и системы сбора данных передавалась в персональный компьютер, в котором происходила регистрация сигнала синхронного детектора с помощью оригинального программного обеспечения. При построении изображений использовалась сканирующая система, сигнал развертки с которой поступал в систему сбора данных для корректной обработки сигнала и дальнейшего построения изображений.

3.3 Флуктуационная чувствительность сверхпроводящего интегрального приемника

Предельное значение флуктуационной чувствительности определяется в соответствии с формулой 1.9. Шумовая температура радиометра, предназначенного для наблюдения космических объектов, обычно существенно превышает температуру наблюдаемого объекта, в этом случае хорошим приближением этой формулы является выражение 1.10.

Для случая тепловизора, предназначенного для получения изображений с температурами близкими к 300 К, возможна ситуация, когда шумовая температура сопоставима либо меньше по величине, чем температура наблюдаемого объекта. В такой ситуации определяющим тепловую чувствительность приёмника фактором становится температура объекта. В предельном случае, когда шумовая температура приёмника существенно ниже температуры объекта, формула 1.9 переходит в выражение:

$$\Delta T_H = 0.612\alpha \frac{T_S}{q}. \quad (3.1)$$

Для изучения зависимости флуктуационной чувствительности от шумовой температуры СИП использовался тракт ПЧ с диапазоном рабочих частот 1.4–1.6 ГГц. Выбор определенного значения шумовой температуры приемника достигался изменением рабочего режима FFO (менялась рабочая частота и уровень накачки смесителя). Сигнал с быстродействующего детектора поступал на синхронный детектор, синхронизированный с частотой обтюлятора. Выходной сигнал синхронного детектора усреднялся с постоянной времени $\tau = 1$ сек. За флуктуационную чувствительность принималось стандартное отклонение сигнала, выраженное в единицах температуры. Все экспериментальные данные были получены без использования ФАПЧ FFO.

На рисунке 3.5 представлены основные характеристики интегрального приемника ТЗ-011#1. На рисунке 3.5А представлены вольтамперные характеристики СИС смесителя (толстая линия соответствует СИС смесителю в отсутствие гетеродина, тонкая — СИС смесителю при частоте гетеродина ~ 650 ГГц).

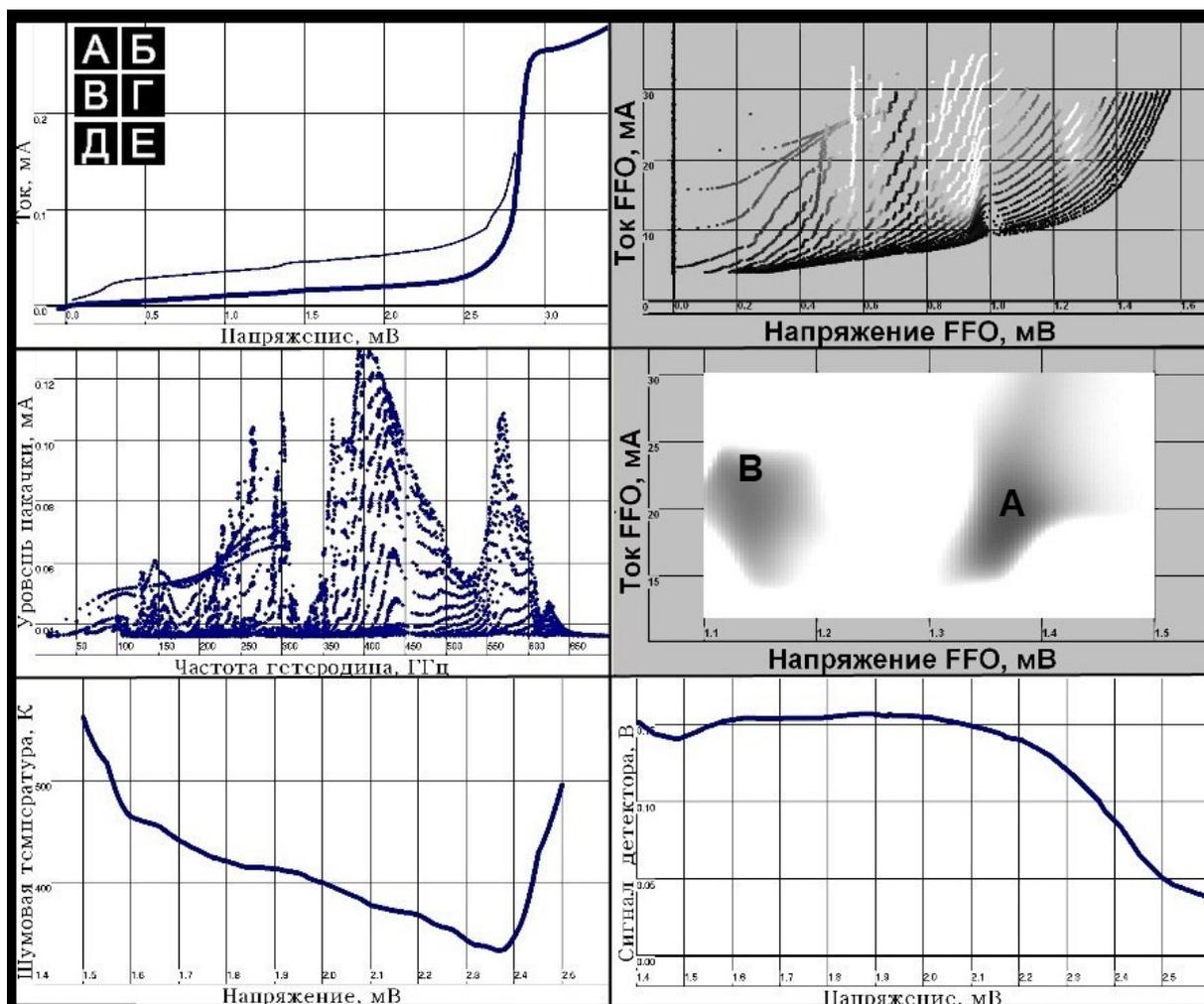


Рис. 3.5. Основные характеристики СИП (Т3-011#1).

На рисунке 3.5Б представлено семейство вольтамперных характеристик гетеродина, при этом цветом в градациях серого показан уровень мощности FFO. Большей величине мощности соответствует более светлый оттенок серого. Переход от одной вольтамперной характеристики к другой производится путем изменения величины магнитного поля пронизывающего джозефсоновский переход FFO.

На рисунке 3.5В представлен график зависимости уровня мощности FFO от частоты, пересчитанный из вольтамперных характеристик FFO. Для большинства применений достаточный уровень мощности FFO соответствует величине накачки в 20–25% от скачка тока на щели туннельного перехода, что для приведенного образца соответствует ~ 60 мкА, исходя из этого видно, что приемник обладает достаточно широким диапазоном рабочих частот по согласованию с гетеродином (300–700 ГГц).

На рисунке 3.5Г представлена зависимость шумовой температуры приемника от выбранной рабочей точки на вольтамперных характеристиках FFO. Измерения шумовой температуры были произведены при помощи стандартной методики измерения Y-фактора (см. выражение 2.1). Цветом в градациях серого показана величина шумовой температуры, при этом более темному цвету соответствуют точки с меньшей шумовой температурой. На приведенном графике имеется 2 минимума шумовой температуры, которые соответствуют следующим рабочим режимам приемника: А — диапазон рабочих частот гетеродина 630–700 ГГц, шумовая температура в оптимальной точке 350 К; В — диапазон рабочих частот гетеродина 500–550 ГГц, шумовая температура в оптимальной точке 500 К. Точки, представленные белым цветом, соответствуют шумовой температурой >2000 К и не представляют интереса для практического использования приемника.

Рисунок 3.5Д демонстрирует зависимость шумовой температуры приемника от величины напряжения смещения смесителя для области А. График, приведенный на рисунке 3.5Е демонстрирует зависимость выходной мощности тракта промежуточных частот от напряжения смещения смесителя. Последние 2 графика носят вспомогательный характер и служат для выработки требований к стабильности источника питания приемника.

Для определения критериев необходимой стабильности источника питания смесителя приведем следующие рассуждения: как известно, мощность на выходе смесителя есть функция шумовой температуры и потерь преобразования, которые в свою очередь зависят от напряжения смещения смесителя:

$$P_{OUT} = k_B (T_R + T_S) G B_H, \quad (3.2)$$

здесь k_B — постоянная Больцмана, B_H — ширина рабочей полосы частот, G — полный коэффициент усиления тракта ПЧ с учетом потерь преобразования смесителя. Считая, что T_S и B_H являются константами, это выражение

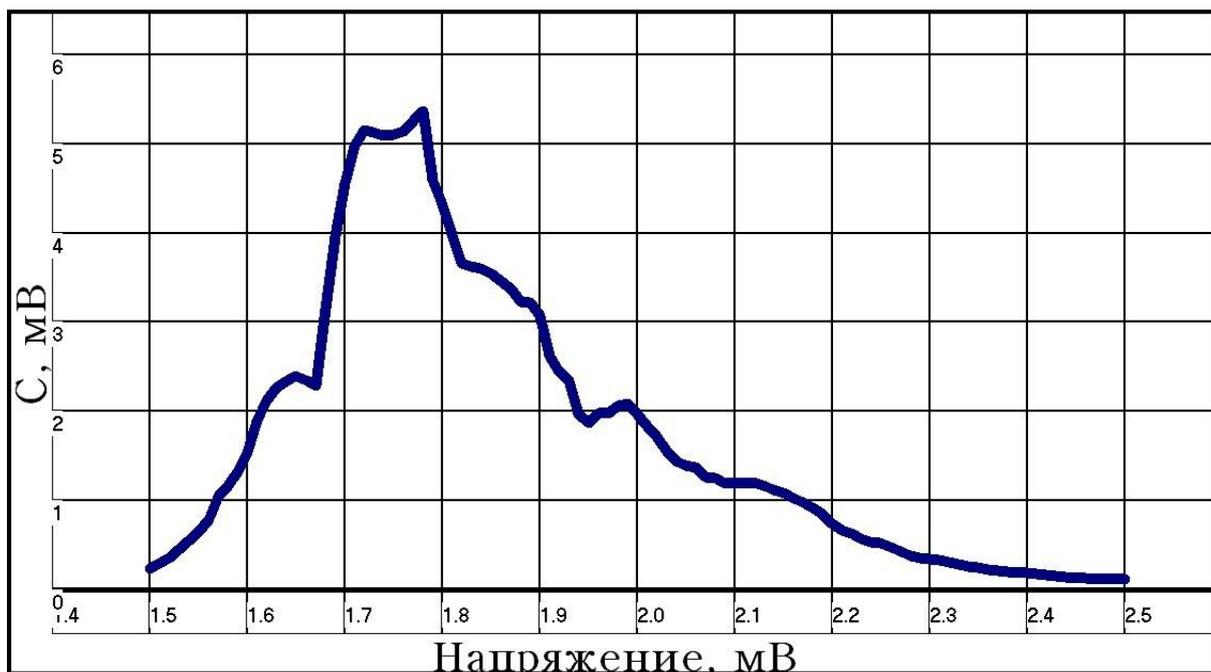


Рис. 3.6. Зависимость коэффициента C в выражении 3.4 от напряжения смещения СИС-смесителя.

можно преобразовать к следующему:

$$\frac{dP_{OUT}}{P_{OUT}} = \frac{dT_R}{T_R + T_S} + \frac{dG}{G}. \quad (3.3)$$

Делая предположение, что шумовая температура и выходная мощность зависят только от величины напряжения смещения, и, переходя от выражения в дифференциалах к выражению в конечных разностях, получим следующую конечную формулу:

$$\Delta U = C \frac{\Delta G}{G}, \quad C = \left(\frac{1}{P_{OUT}} \frac{dP_{OUT}}{dU} + \frac{1}{T_R + T_S} \frac{dT_R}{dU} \right)^{-1}. \quad (3.4)$$

Знак "+" в выражении 3.4 взят из условия минимизации коэффициента C . Результат расчета величины C представлен на рис. 3.6, этот расчет сделан, исходя из экспериментальных данных, представленных на рисунках 3.5Д и 3.5Е. В точке с оптимальной шумовой температурой значение этой величины соответствует по порядку величины 1 мВ. Учитывая предыдущий опыт работы с НЕВ смесителями можно предположить, что для большинства применений значение коэффициента $\Delta G/G$ не должно превосходить 0.1%, в противном случае вклад паразитных компонентов в флуктуационную чувствительность приемника будет чрезмерен и теоретический предел чувствительности будет сложно достигнуть, используя методы, описанные в разделе 2.2. Комбинация

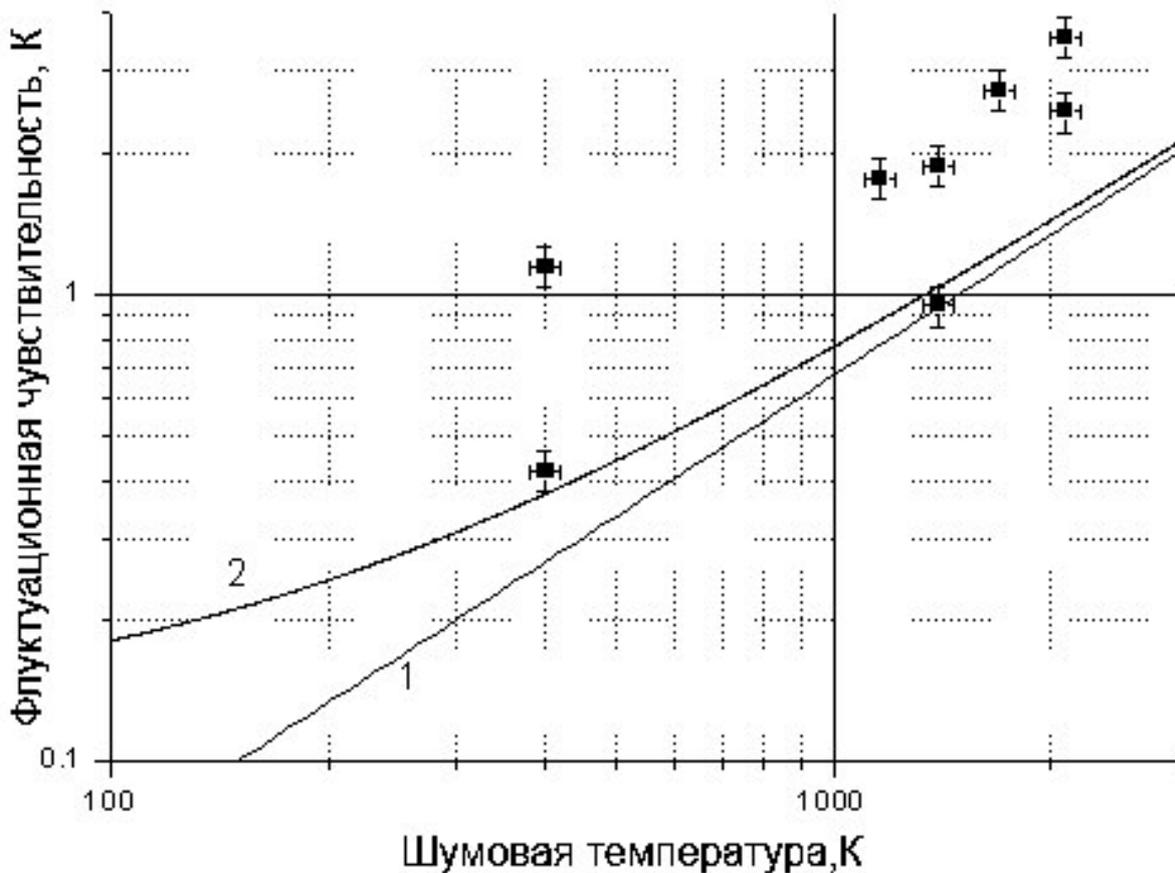


Рис. 3.7. Зависимость флуктуационной чувствительности приемника от его шумовой температуры. Точками представлены экспериментальные значения, кривые — расчет по формулам 1.9 и 1.10. Обе кривые построены при $q = 1.4 \cdot 10^4$ (ширина полосы усиления тракта промежуточной частоты $B_H = 200$ МГц и постоянная времени усреднения $\tau = 1$ с.). Кривой (2) соответствует $T_S = 300$ К (комнатная температура).

этих двух чисел и устанавливает требования к источнику смещения смесителя. Стабильность напряжения смещения для использования приемника в системах технического зрения должна быть не хуже 1 мкВ.

На рис. 3.7 представлены измеренные значения флуктуационной чувствительности в зависимости от шумовой температуры приемника. Кривыми показаны значения предельной флуктуационной чувствительности, вычисленные по формулам 1.9 и 1.10. Погрешность измерения флуктуационной чувствительности определялась временем накопления сигнала и не превышала 7%. Погрешность измерения шумовой температуры не превышала 10%. Большой разброс экспериментальных точек и превышение измеренных значений над теоретическим пределом связан с тем фактом, что флуктуационная чувствительность является функцией величины входного сигнала и с уменьшением величины входного сигнала значение флуктуационной чувствительности

приближается к теоретическому пределу (см. раздел 2.2). В случае больших шумовых температур вообще было невозможным уменьшить входной сигнал для достижения предельной флуктуационной чувствительности приемника. Однако, в ряде случаев достижение предельной флуктуационной чувствительности продемонстрировано приведенным графиком. При этом кривая (2) служит предельным случаем, ниже которого значение ΔT_H быть не могут.

Для достижения предельного значения флуктуационной чувствительности использовалась приемная система с большей шириной полосы промежуточных частот. Помимо этого дополнительно использовалась система фазовой автоподстройки частоты гетеродина. Измерения были проведены с двумя приемниками T4m-093#11m и T4m-093#6m. Первый из этих приемников обладал шумовой температурой 170 К на частоте 500 ГГц, второй приемник обладал шумовой температурой ~ 90 К при частоте гетеродина 507 ГГц. Основные характеристики приемника T4m-093#6m, как лучшего из двух, приведены на рис. 3.8.

Определение флуктуационной чувствительности приемника проводилось путем оценки стандартного отклонения сигнала синхронного усилителя по методике, описанной в разделе 2.2. На рис. 3.9 представлены временные зависимости сигнала синхронного усилителя, выраженного в единицах температуры. При уменьшении величины сигнала флуктуационная чувствительность приемника улучшается в соответствии с рассуждениями, описанными в разделе 2.2. Для приемника T4m-093#11m при разности температур объект-лопасти модулятора 170 К флуктуационная чувствительность составляла 150 ± 30 мК, при снижении величины сигнала до 2.1 К ΔT_H уменьшилась более чем в 10 раз до значения 13 ± 2 мК. Для приемника T4m-093#6m, обладающего более низкой шумовой температурой, при разности температур объект-лопасти модулятора ~ 173.5 К флуктуационная чувствительность составляла 140 ± 15 мК, при снижении величины сигнала до величины ~ 2.95 К ΔT_H достигла значения 10 ± 1 мК. Величина погрешности определяется продолжительностью записи сигнала и пропорциональна $(\tau/T)^{0.5}$, где τ — постоянная времени синхронного усилителя, а T — время записи сигнала.

Стоит отметить тот факт, что с уменьшением шумовой температуры в 2 раза при переходе от приемника T4m-093#11m к приемнику T4m-093#6m изменение флуктуационной чувствительности составило всего 30%. Этот факт подчеркивает сложность дальнейшего улучшения флуктуационной чувствительности за счет снижения шумовой температуры приемника, что следует из выражения 1.9. Полученные значения флуктуационной чувствительности, представленные в данном разделе, являются рекордными для супергетеродинных приемников терагерцового диапазона и сравнимы с наилучшими показателями для приемников прямого детектирования.

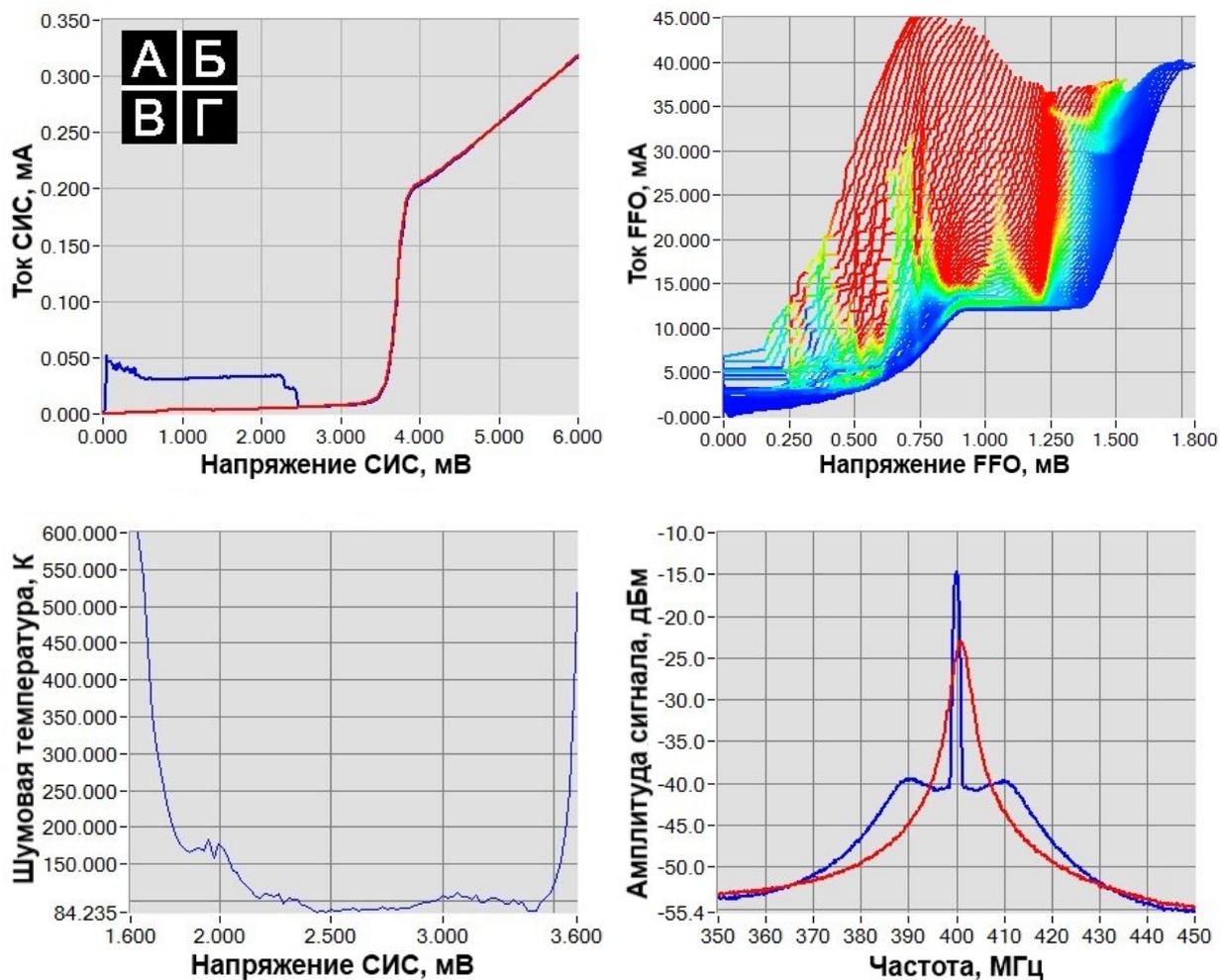


Рис. 3.8. Основные характеристики приемника Т4m-093#6m. А: Вольт амперные характеристики СИС смесителя: синяя кривая – вольт амперная характеристика с неподдавленным стационарным эффектом Джозефсона, красная кривая – вольт амперная характеристика с оптимальным током контрольной линии, подавляющим критический ток туннельного перехода. Б: Вольт амперные характеристики FFO, в зависимости от магнитного поля, понизывающего туннельный переход, цветом показан уровень накачки СИС-смесителя. В: Зависимость шумовой температуры приемника от величины напряжения смещения при частоте гетеродина 507 ГГц. Г: Характеристики линии генерации гетеродина: красным цветом показана линия генерации гетеродина в автономном режиме, синим – при включении ФАПЧ. Линия генерации гетеродина получена с выхода гармонического смесителя интегрированного в микросхеме приемника на промежуточной частоте гармонического смесителя ~ 400 МГц.

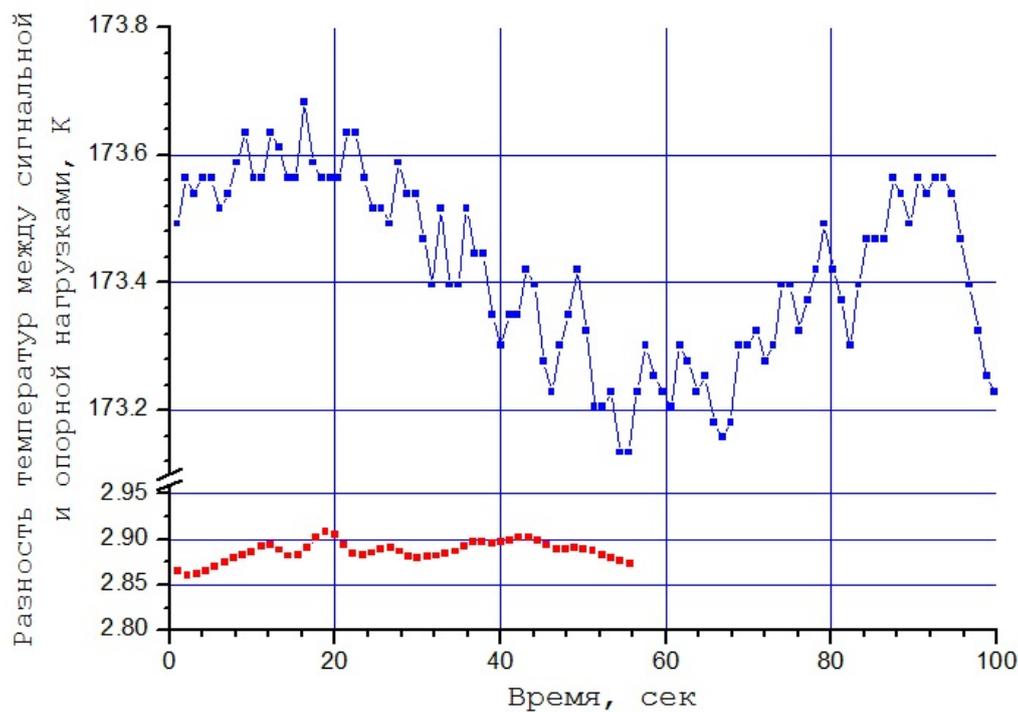
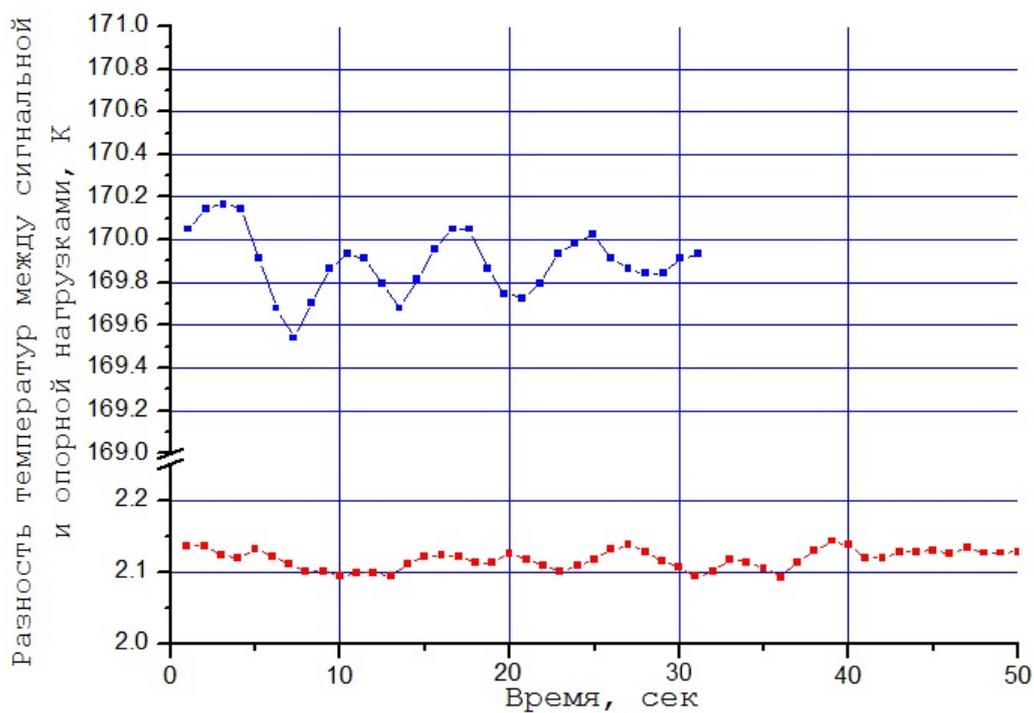


Рис. 3.9. Временные зависимости выходного сигнала синхронного усилителя от величины входного сигнала. В качестве величины входного сигнала считалась разница физических температур нагрузки и лопастей механического обтюлятора. Сверху приведены зависимости выходного сигнала для образца Т4м-093#11м, снизу аналогичные характеристики для приемника Т4м-093#6м.

3.4 Временная стабильность сверхпроводящего интегрального приемника

Помимо такого важного параметра как флуктуационная чувствительность, для использования приемника в системах радиовидения также важна и временная стабильность приемника. Поскольку в системах с механической сканирующей системой время получения одного кадра может занимать существенное время, вплоть до нескольких секунд, то важно добиться высокой стабильности приемника, существенно превышающей время получения кадра, поскольку в противном случае полученное изображение может быть искажено, а флуктуационная чувствительность в целом по кадру превышать предельные параметры системы.

Ранее, в разделе 3.3, уже вводились некоторые эмпирические требования к используемым источникам смещения. Настоящий параграф посвящен разработке метода увеличения временной стабильности приемника. Стабильность приемника удобно рассматривать в терминах вариации Аллана [120]. Диаграмма Аллана обычно включает 3 участка: понижающийся с увеличением постоянной времени, идущий горизонтально и повышающийся с увеличением постоянной времени. Временем Аллана обычно называют постоянную времени, при которой начинается отклонение от зависимости $\sigma^2 \sim 1/\tau$. Обычно, для увеличения времени Аллана термостабилизируют приемники, усилители и источники смещения. Вторым способом увеличения времени Аллана является заужение полосы приема сигнала [117], поскольку горизонтальный и повышающийся участок диаграммы Аллана вызваны коррелированным шумом (например влиянием фликкер-шума на коэффициент усиления тракта ПЧ или тепловой дрейфт источников смещения приемника), то с уменьшением полосы приема сигнала в N раз уровень флуктуаций этих участков также снижается в N раз. При этом уровень снижающегося участка диаграммы Аллана, вызванный некоррелированным белым шумом, с уменьшением полосы приема сигнала в N раз снижается в \sqrt{N} раз, что и приводит к увеличению времени Аллана.

Первый вариант увеличения времени Аллана (повышение стабильности узлов приемника) является достаточно трудоемким и дорогостоящим, а следовательно, использование его при изготовлении системы радиовидения, рассчитанной на массовые применения, крайне нежелательно. Второй вариант приводит к уменьшению полосы приема сигнала, а следовательно, приводит к снижению чувствительности приемника. Для использования СИП в коммерческих системах необходимо предложить простой метод увеличения времени Аллана для приемника, не требующий существенного усложнения системы.

Различного рода нестабильности, присущие приемнику, могут проявляться в виде изменения общего коэффициента преобразования, включая изме-

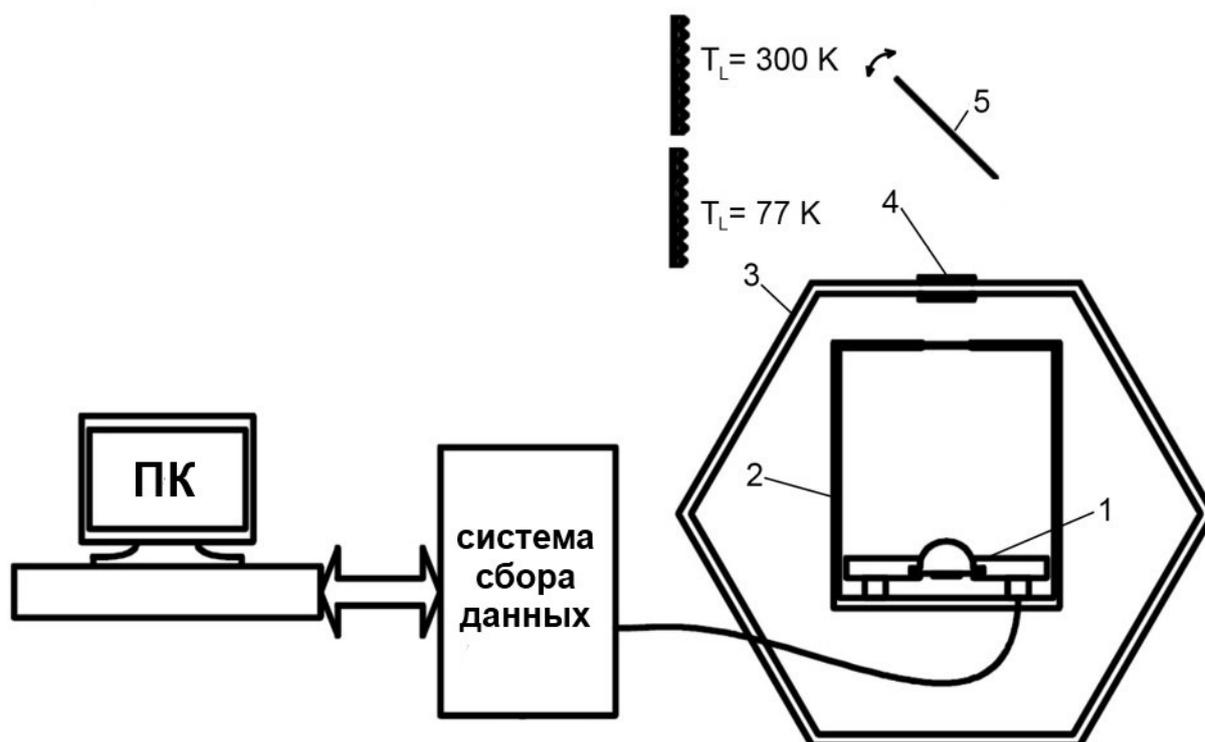


Рис. 3.10. Блок-схема экспериментального стенда для увеличения стабильности СИП. 1 – держатель с закрепленными на нем кремниевой линзой, микросхемой приемника и платой сопряжения, 2 – магнитный экран, 3 – криостат, 4 – оптическое окно криостата, 5 – подвижное зеркало.

нения коэффициента усиления тракта ПЧ, либо изменения коэффициента шума приемника или его шумовой температуры. Как показывает опыт работы с НЕВ-смесителем и СИП изменение коэффициента преобразования вносит более существенный характер в стабильность приемника. Поэтому, в первом приближении, можно предположить, что выходной сигнал приемника определяется радиофизической яркостной температурой наблюдаемого объекта и мгновенным значением коэффициента преобразования приемника (см. выражение 3.2). Для коррекции изменения коэффициента преобразования приемника использовалась подвижное зеркало, которое могло находиться в 2-х положениях: в первом положении приемник "смотрел" на опорную нагрузку (температурой 77 К), во втором положении приемник "смотрел" на сигнальную нагрузку (температурой 300 К). Блок-схема экспериментального стенда представлена на рисунке 3.10. Время переключения зеркала из одного положения в другое составляло 1.8 мсек.

Продетектированный ПЧ сигнал подавался на систему сбора данных, которая также управляла зеркалом и регистрировала его положение. Система сбора данных одновременно измеряла величину сигнала для опорной и сигнальной нагрузок и производила корректировку сигнала с учетом изменения

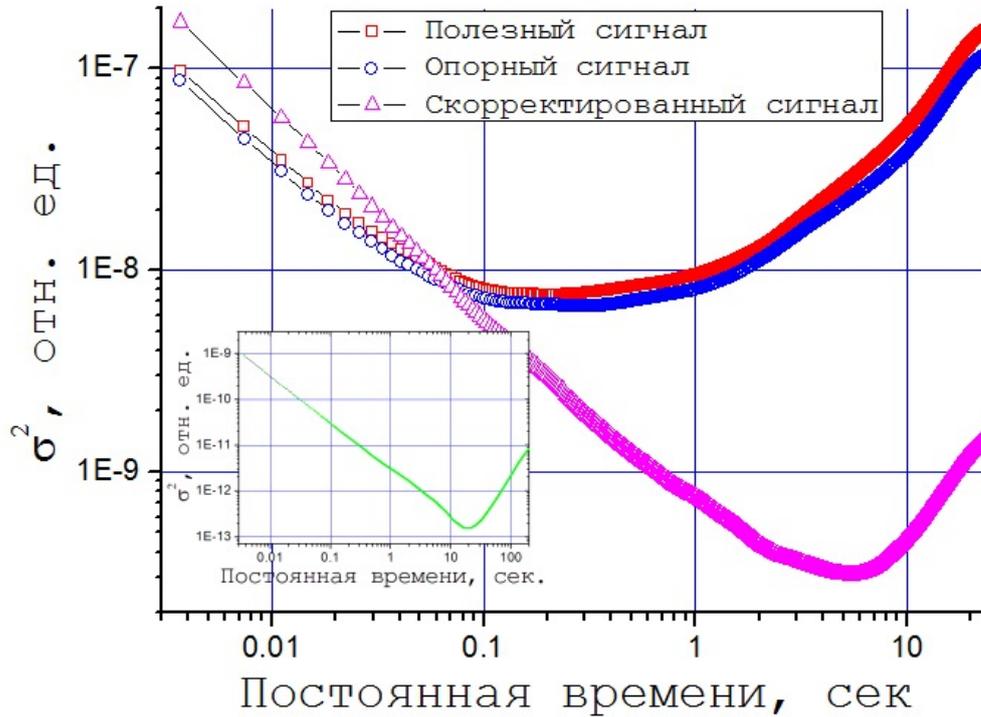


Рис. 3.11. Вариация Аллана для опорного, полезного сигнала и скорректированного сигналов при ширине полосы тракта ПЧ 4 ГГц, на вставке представлен результат корректировки сигнала в случае ширины полосы тракта ПЧ 40 МГц.

сигнала опорной нагрузки. Для измерений в реальном времени удобно использовать следующее корректировочное выражение:

$$S'_{OUT_i} = \frac{S_{OUT_i}}{S_{REF_i}} S_{REF_0}, \quad (3.5)$$

здесь S_{REF_0} – выходной сигнал в начальный момент, для приемника ”смотрящего” на опорную нагрузку, S_{OUT_i} и S_{REF_i} – мгновенное значение выходного сигнала приемника ”смотрящего” на сигнальную и опорную нагрузки соответственно, S'_{OUT_i} – скорректированное значение выходного сигнала. Программное обеспечение системы сбора данных позволяет на лету производить корректировку выходного сигнала.

На рисунке 3.11 представлена вариация Аллана для опорного сигнала, полезного сигнала и скорректированного в соответствии с выражением 3.5. Флуктуации скорректированного сигнала при малых временах интегрирования больше, чем флуктуации каждого из измеряемых сигналов, в соответствии с выражением $\sqrt{\sigma_{REF}^2 + \sigma_{OUT}^2}$. На графике видно, что использование корректировочной методики позволяет снизить влияние $1/f$ шума и дрефтов на

стабильность выходного сигнала более чем на порядок, при этом время Аллана было увеличено с десятых долей секунды до 5 сек (при ширине полосы тракта ПЧ – 4 ГГц). Вставка на рисунке 3.11 показывает результат корректировки выходного сигнала в случае узкой полосы тракта ПЧ. В этом случае при ширине полосы в 40 МГц удается достигнуть времени Аллана в 20 сек.

Стоит подчеркнуть, что продемонстрированное увеличение времени Аллана, получено лишь с использованием математической обработки сигнала без использования сложных схем стабилизации коэффициента преобразования приемника. Достоинство метода можно увидеть в сравнении со стандартными методиками [117]. Авторы этой работы использовали стабилизированный тракт ПЧ с шириной полосы 17 МГц. Время Аллана, продемонстрированное в этой работе существенно ниже полученного при корректировке выходного сигнала. Отклонение вариации Аллана от радиометрического выражения начинается уже при нескольких секундах.

3.5 Получение терагерцовых изображений при помощи сверхпроводникового интегрального приемника

Для получения изображений установка представленная на рис. 3.4 была модифицирована включением в нее оптической и сканирующей систем. Блок-схема лабораторного макета тепловизора на основе СИП представлена на рис. 3.12. В сравнении с лабораторной установкой тепловизора, использующего в качестве ключевого элемента смеситель на горячих электронах, представленный макет обладает преимуществом по компактности, что делает его более привлекательным для практического использования.

Оптическая система макета представлена двумя параболическими зеркалами. Использование зеркал с большой апертурой позволяло достигнуть пространственного разрешения ~ 1 мм, в плоскости объекта. Для осуществления развертки объект закреплялся на двухосевой механический сканер. В качестве фона использовалось абсолютно черное тело, изготовленное из материала ECCOSORB® , с изменяемой температурой. На рис. 3.13 приведено изображение тестового объекта «звезда», выполненное в видимом и терагерцовом диапазоне частот (частота гетеродина 500 ГГц). Материал, из которого изготовлен тестовый объект, также является абсолютно черным телом, с температурой равной комнатной. Температура фона для приведенного изображения, отличалась от температуры объекта примерно на 15 К, что соответствует разности температур тела человека и объектов, окружающих его при нормальных условиях. Представленное изображение получено размытием экспериментальных точек и заполнением пустых мест с использованием

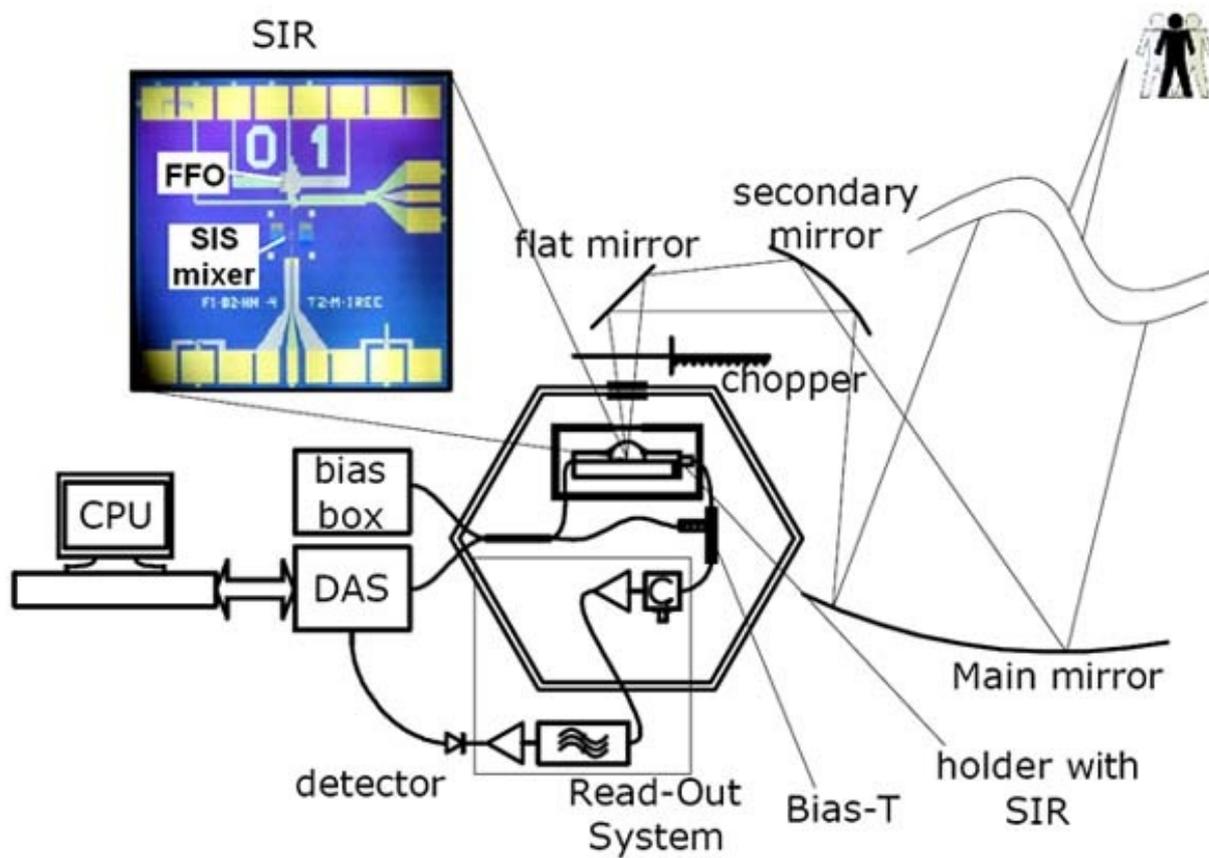


Рис. 3.12. Блок схема лабораторного макета тепловизора терагерцового диапазона частот.



Рис. 3.13. Терагерцовое изображение тестового объекта «звезда» и его изображение в оптическом диапазоне.

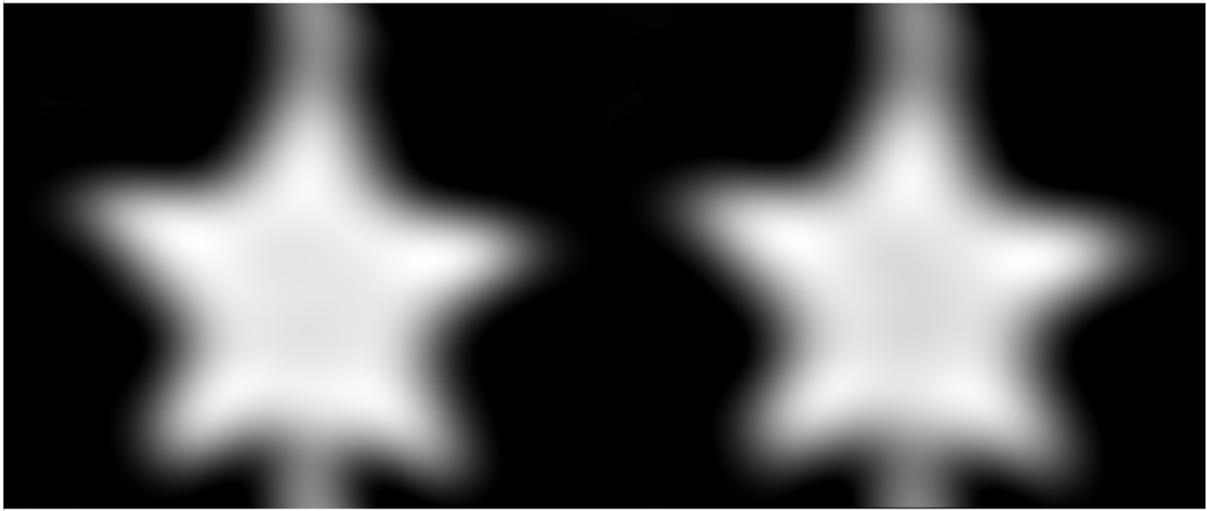


Рис. 3.14. Результат действия фильтра по Винеру (а) и фильтра по Тихонову (б) с оптимальными параметрами на терагерцовое изображение объекта.

гауссового пространственного фильтра низких частот. Изображение является достаточно четким, узнаваемым и демонстрирует возможность системы к получению изображений различных объектов.

Для улучшения качества изображения, увеличения резкости изображения возможно использование алгоритмов сверхразрешения. В качестве примера на рис. 3.13 приведены изображения, полученные из изображения в терагерцовом диапазоне с использованием фильтрации по Винеру и фильтрации по Тихонову с оптимальными параметрами [108]. Оба алгоритма сверхразрешения дают схожий результат, позволяющий существенно улучшить четкость изображения. Для корректного использования предложенных алгоритмов необходима информация об аппертурной функции оптической системы приемника. Для простоты аппертурная функция была представлена гауссовой функцией распределения с шириной, подбираемой экспериментально для достижения оптимального результата.

3.6 Выводы к главе

В настоящей главе продемонстрирован способ достижения предельных флуктуационных характеристик на примере сверхпроводящего интегрального приемника. Полученное в работе лучшее значение в 10 ± 1 мК при постоянной времени 1 с. является рекордной для супергетеродинных приемников терагерцового диапазона частот. Полученные значения флуктуационной чувствительности соответствуют теоретическим предсказаниям.

Предложенный в работе способ корректировки сигнала в реальном времени позволяет существенно увеличить времена стабильности приемника. Ис-

пользование более стабильных систем позволяет увеличить время получения кадра, а значит и температурное разрешение кадра. При разработке системы радиовидения, основанной на супергетеродинном приемнике, необходимо сочетать широкую полосу промежуточных частот (для обеспечения высокой температурной чувствительности) и высокое время стабильности системы, превышающее время получения кадра. Сочетать эти два параметра достаточно сложно. Предложенный способ корректировки сигнала позволяет получать высокую стабильность выходного сигнала, при этом этот способ достаточно прост для реализации его в практических устройствах. Для этого достаточно лишь перекрыть часть апертуры приемника сигнальной нагрузкой известной температуры и проводить перекалибровку системы в реальном времени.

Заключение

В монографии продемонстрированы следующие основные результаты:

1. Впервые исследована флуктуационная чувствительность терагерцового супергетеродинного приемника на основе НЕВ смесителя. Полученная флуктуационная чувствительность (0.45 К при постоянной времени 1 с., шумовой температуре смесителя ~ 2000 К и частоте гетеродина ~ 300 ГГц) является рекордной для этого типа супергетеродинных приемников.
2. Впервые исследована флуктуационная чувствительность сверхпроводящего интегрального приемника, в котором объединены СИС смеситель и генератор гетеродина FFO. Полученная флуктуационная чувствительность (10 мК при постоянной времени 1 с., шумовой температуре смесителя ~ 90 К и частоте гетеродина ~ 500 ГГц) является рекордной для этого типа супергетеродинных приемников.
3. Впервые изучено влияние паразитных вкладов (стабильность источников питания приемника, стабильность гетеродина) в формирование флуктуационной чувствительности супергетеродинного приемника и предложена простая методика достижения предельных значений чувствительности терагерцевых тепловизоров. Предложенная методика позволила получить рекордные значения флуктуационной чувствительности для обоих типов приемников.
4. Предложена и опробована методика увеличения временной стабильности приемника с помощью математической обработки выходного сигнала. Достигнутое время стабильности системы (время Аллана) составило ~ 5 с. при ширине полосы промежуточных частот ~ 4 ГГц. Для использования приемника в практических целях при конструировании системы построения радиоизображений необходимо, чтобы это время стабильности системы превышало время получения кадра, в противном случае будет наблюдаться ухудшение температурного разрешения системы. Полученное время стабильности существенно превышает время, используемое в стандартах веб-камер (2-3 кадра в секунду).

5. С помощью разработанных приемников получены тепловые изображения в терагерцевом диапазоне частот, продемонстрировано влияние препятствий на качество изображения, а также разработаны требования к возможности получения тепловых изображений за препятствиями;

Достоверность полученных результатов обеспечивается и подтверждается согласием полученных данных с экспериментальными и теоретическими исследованиями других авторов.

Флуктуационная чувствительность, полученная для НЕВ смесителей в этой работе, существенно хуже по сравнению с чувствительностью интегрального приемника. Роль НЕВ смесителя становится определяющей на частотах выше 1 ТГц, поскольку СИС-смеситель, являющийся ключевым элементом СИП, на этих частотах работать не будет. В данной работе не приводятся результаты работы авторов с НЕВ смесителями на частотах выше 1 ТГц. Имеющиеся в распоряжении приемники обладают низкими шумовыми температурами (от 700 К на частоте 2.5 ТГц), однако, стабильность используемого гетеродина (газовый лазер, работающий на смеси паров воды и водорода) не позволяла получить предельные значения флуктуационной чувствительности.

Представленные в работе результаты перспективны с точки зрения их коммерческого использования. На момент написания этой работы компания ЗАО "Сверхпроводниковые нанотехнологии", созданная сотрудниками и аспирантами УНРЦ МПГУ, основываясь на результатах данного исследования, проводит разработку прототипа пассивного терагерцового тепловизора диапазона 500–600 ГГц на основе сверхпроводящего интегрального приемника.

Работа была выполнена при поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ № НШ-1918.2014.2 и мегагранта договор № 14.В25.31.0007 от 26.06.2013 г.

Литература

1. Chan Wai Lam, Deibel Jason, Mittleman Daniel M. Imaging with terahertz radiation // Rep. Prog. Phys. 2007. no. 70. Pp. 1325–1379.
2. Wei J., Olaya D., Karasik B.S. et al. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics // Nat. Nanotechnol. 2008. no. 3. P. 496–500.
3. Sisov F. THz radiation sensors // OPTO-ELECTRONICS REVIEW. 2010. Vol. 18, no. 1. Pp. 10–36.
4. Crowe T.W., Bishop W.L., Porterfield D.W. et al. Opening the terahertz window with integrated diode circuits // IEEE J. Solid-St. Circ. 2005. Vol. 40. P. 2104–2110.
5. Phillips T. G., Keene J. Submillimeter astronomy // Proc. IEEE. 1992. Vol. 80. Pp. 1662–1678.
6. Siegel P. H. Terahertz Technology // Proc. IEEE. 2002. — March. Vol. 50, no. 3. Pp. 910–928.
7. Leisawitz D., et al. Scientific motivation and technology requirements for the SPIRIT and SPECS far-infrared/submillimeter space interferometers // Proc. SPIE, vol. 4013. 2000. Pp. 36–46.
8. <http://sron.nl>.
9. Кошелец В. П., Филиппенко Л. В., Борисов В. Б. и др. Интегральный сверхпроводниковый бортовой спектрометр субмм диапазона длин волн для атмосферных исследований // Известия ВУЗов "Радиофизика". 2007. Т. L, № 10-11. С. 935 – 940.
10. <http://herschel.esac.esa.int/links.shtml>.
11. <http://www.sofia.usra.edu>.
12. <http://www.asc.rssi.ru/millimetron>.

13. <http://www.alma.nrao.edu>.
14. <http://www.apex-telescope.org>.
15. <http://sma-www.cfa.harvard.edu>.
16. Рябов В. А., Царев В. А., Цховребов А. М. Поиски частиц тёмной материи // УФН. 2008. № 178. С. 1129.
17. Peebles P. J. E., Ratra Bharat. The cosmological constant and dark energy // Reviews of Modern Physics. 2003. no. 75. Pp. 559—606.
18. Климов К. М. Радиовидение // Большая Советская Энциклопедия.
19. Пирогов Ю. А. Пассивное радиовидение в миллиметровом диапазоне длин волн // Известия ВУЗов "Радиофизика". 2003. Т. XLVI, № 8 – 9. С. 660 – 670.
20. Lüdi A. Passive Abbildende Systeme im mm-Wellen Bereich. Institut für angewandte Physik, Universität Bern. 2000.
21. Yujiri L., Shoucri M., Moffa P. Passive millimeter wave imaging // IEEE Microwave Magazine. 2003. Vol. 4, no. 3. Pp. 39 – 50.
22. Appleby R. Passive millimetre-wave imaging and how it differs from terahertz imaging // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 2004. Vol. A 362. Pp. 379 – 394.
23. Shoucri M., Davidheiser R., Hauss B. et al. A passive millimeter wave camera for landing in low visibility conditions // Aircraft Design, Systems and Operations Meeting. Monterey, CA, USA: 1993. — Aug 11-13. Pp. 1 – 7.
24. Lettington A. H., Dunn D., Alexander N. E. et al. Design and development of a high-performance passive millimeter-wave imager for aeronautical applications // Proc. SPIE. Vol. 5410. 2004. Pp. 210 – 218.
25. Blankson I. M. Passive Millimeter-Wave Imaging: Application To Aviation Safety In Extremely Poor Visibility // 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV, USA: 2005. — 10-13 Jan. P. 15.
26. Физическая экология (Физические проблемы экологии): Сб. статей / Под ред. В. И. Трухин, Ю. А. Пирогов, К. В. Показеев. Спец. выпуск Вестн. МГУ. Сер.3, Физ. Астроном., 1998. – №4 – С. 84.

27. Пирогов Ю. А., Гладун В. В., Тищенко Д. А. и др. Пассивная система радиовидения сверхвысокого разрешения для мониторинга объектов природной среды // Физические проблемы экологии (Физическая экология): Тез. докл. всерос. научн. конф. Москва: Изд. Физического факультета МГУ, 1999. С. 145 – 146.
28. Lesurf J. C. G. MMW Imaging for Volcanology. University of St. Andrews. 2001. P.11.
29. Robertson D. A., Macfarlane D. G. AVTIS: All-weather Volcano Topography Imaging Sensor // Joint 29th Int. Conf. on IR and MM Waves and 12th Int. Conf. on THz Electronics: Conference Digest. Karlsruhe: 2004. Pp. 813 – 814.
30. Huguenin Richard G. The Detection of Hazards and Screening for concealed Weapons with Passive Millimeter Wave Imaging Concealed Threat Detectors // Millivision Technologies. 2005.
31. Grafulla-Gonzalez B., Haworth C. D., Harvey A. R. et al. Millimetre-Wave Personnel Scanners for Automated Weapon Detection // International Workshop on Pattern Recognition for Crime Prevention, Security and Surveillance. Bath, UK: 2005. Pp. 48 – 57.
32. Anderton R. N., Appleby R., Coward P. R. et al. Security scanning at 94GHz // Proc. of SPIE. 2006. – Vol. 6211.
33. Baharav Z. I., Lee G. S., Taber R. C. Millimeter wave imaging system for personnel screening: scanning 107 points a second and using no moving parts // Proc. of SPIE. 2006. – Vol. 6211.
34. Robertson D. A. MISTM: Medical Imager for Sub-surface Temperature Mapping // Joint 29th Int. Conf. on IR and MM Waves and 12th Int. Conf. on THz Electronics: Conference Digest. Karlsruhe: 2004. Pp. 519 – 520.
35. Dallinger A., Schelkshorn S., Detlefsen J. Millimeter-Wave Imaging of Humans – Basic Experiments // Joint 29th Int. Conf. on IR and MM Waves and 12th Int. Conf. on THz Electronics: Conference Digest. Karlsruhe: 2004. Pp. 521 – 522.
36. Зинченко И. И. "Радиовидение" в астрономии // XXXIV студенческая научная конференция "Физика Космоса". Коуровка: 2005.
37. Пирогов Ю. А., Гладун В. В., Терентьев Е. Н. и др. Проблемы сверхразрешения системы радионаблюдения за солнцем в 3-мм диапазоне //

- Физические проблемы экологии (Физическая экология): Тез. докл. всерос. научн. конф. Москва: Изд. Физического факультета МГУ, 1999. С. 146 – 147.
38. Doyle R., Lyons B., Walshe J. et al. Low Cost Millimetre Wave Camera Imaging up to 140GHz // 34th European Microwave Conference. Amsterdam: 2004. Pp. 1285 – 1289.
 39. Тепловидение // Физическая энциклопедия.
 40. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. Москва: Мир, 1970.
 41. Crowe T. W., Mattauch R. J., Roser H. P. et al. GaAs Schottky Diodes for THz Mixing Applications // Proc. IEEE. 1992. Vol. 80. Pp. 1827 – 1841.
 42. Gearhart S. S., Hesler J., Bishop W. L. et al. A Wide-band 760-GHz Planar Integrated Schottky Receiver // IEEE Microwave and Guided Wave Lett. 1993. Vol. 3. Pp. 205 – 297.
 43. Hesler J. L., Crowe T. W., Weikle R. M. et al. The Design, Construction, and Evaluation of a 585 GHz Planar Schottky Mixer // Proceedings of the 6th Int. Symp. on Space Terahertz Technology. California Institute of Technology, Pasadena: 1995. Pp. 34 – 44.
 44. Richards P. L., et al. Quasiparticle heterodyne mixing in SIS tunnel junctions // Appl.Phys.Lett. 1979. Vol. 34. P. 345.
 45. Гершензон Е. М., Гольцман Г. Н., Гогидзе И. Г. и др. Смеситель миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн на основе разогрева электронов в резистивном состоянии сверхпроводниковых пленок // СФХТ, 3, N10 (часть I). 1990. С. 2143 – 2160.
 46. Maslennikov S. N., Finkel M. I., Antipov S. V. et al. Spiral antenna coupled and directly coupled NbN HEB mixers in the frequency range from 1 to 70THz // Proc. 17-th international symposium on space terahertz technology. Paris, France: 2006. — may. Pp. 177 – 179.
 47. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54, no. 3302.
 48. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56, no. 3284.
 49. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58, no. 441.

50. Nagatsuma T., Enpuku K., Irie F., Yoshida K. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63, no. 1130.
51. Сизов Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения в "невидимых" участках спектра. Киев: Академперіодика, 2008.
52. <http://www.teraview.co.uk>.
53. Kemp M.C., Taday R. F., Cole B. E. et al. Security Applications of Terahertz Technology // Proceedings of SPIE. 2003. Vol. 5070.
54. Bjarnason J. E., Chan T. L. J., Lee A. W. M. et al. Millimeter-wave, terahertz, and mid-infrared transmission through common clothing // Applied Physics Letters. 2004. — Jul. Vol. 85, no. 4. Pp. 519 – 521.
55. Kawase Kodo, Ogawa Yuichi, Minamide Hiroaki, Ito Hiromasa. Terahertz parametric sources and imaging applications // Semicond. Sci. Technol. 2005. no. 20. Pp. 258 — 265.
56. http://en.wikipedia.org/wiki/RGB_color_model.
57. Lauterbur P. C. Image Formation by Induced Local Interactions: Examples of Employing Nuclear Magnetic Resonance // Nature 242: 190–1. 1973.
58. <http://en.wikipedia.org/wiki/MMIC>.
59. Zimdars D., White J., Stuck G., et al. Time Domain Terahertz Imaging of Threats in Luggage and Personnel // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2007. Vol. 17, no. 2.
60. Karpovicz N., Dawes D., Perry M. J., Zhang X.-C. Fire damage on carbon fiber materials characterized by THz waves // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2007. Vol. 17, no. 2. Pp. 213 – 224.
61. Zhong H., Redo-Sanchez A., Zhang X.-C. Standoff sensing and imaging of explosive related chemical and bio-chemical materials using THz-TDS // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2007. Vol. 17, no. 2. Pp. 239 – 249.
62. Xie X., Dai J., Yamaguchi M., Zhang X.-C. Ambient air using the nonlinear media for THz wave generation // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2007. Vol. 17, no. 2. Pp. 261 – 270.
63. Chen Y., Liu H., Zhang X.-C. Experimental and density functional theory study on THz spectra of 4-NT and 2, 6-DNT // International Journal of High Speed Electronics and Systems. 2007. Vol. 17, no. 2. Pp. 283 – 291.

64. <http://www.zomega-terahertz.com/>.
65. <http://www.frascati.enea.it/THZ-BRIDGE/>.
66. Karpowicz N., Zhong H., Xu J. et al. Comparison between pulsed terahertz time-domain imaging and continuous wave terahertz imaging // *Semicond. Sci. Technol.* 2005. Vol. 20. Pp. 293 — 299.
67. Hübers H.-W. Active Terahertz Imaging for Security (TeraSec). SRC 07, Berlin, 27.03.2007.
68. Краус Д. Д. Радиотехника. Пер. с англ., под ред. Железнякова В. В. Москва: Сов. радио, 1973.
69. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. Москва: Наука, 1973.
70. Зражевский А. Ю., Голунов В. А., Гапонов С. С. и др. Особенности и возможности поляризационного стереорадиовидения в ММ-диапазоне волн // *Радиотехника.* 2006. № 5 – 6.
71. Davenport W. B., Root W. L. An Introduction to the theory of random signals and noise. New York: IEEE Press, 1985.
72. Balanis Constantine A. Antenna Theory: Analysis and Design. 1997.
73. Гершензон Е. М., Гершензон М. Е., Гольцман Г. Н. и др. О предельных характеристиках быстродействующих сверхпроводниковых болометров.
74. Allen C. A., et al. A Dry-Etch Process for Low Temperature Superconducting Transition Edge Sensors for Far Infrared Bolometer Arrays // *Low Temperature Detectors.* 2003. no. 10.
75. Staguhn J.G., et al. TES Detector Noise Limited Readout Using SQUID Multiplexers // *AIP-CP № 605, Low Temperature Detectors.* 2001. Pp. 321 – 324.
76. Luukanen A., Grossman E. N., Miller A. J. et al. An ultra-low noise superconducting antenna-coupled microbolometer with a room-temperature readout // *IEEE Microwave and wireless components letters.* 2006. — August. Vol. 16, no. 8.
77. Helistö P., Luukanen A., Grönberg L. et al. Antenna-coupled microbolometers for passive THz direct detection imaging arrays // *Proceedings of the 1st European Microwave Integrated Circuits Conference.* Manchester UK: 2006. — September. Pp. 35 – 38.

78. Luukanen A., Grönberg L., Helistö P. et al. An array of antenna-coupled superconducting microbolometers for passive indoors real-time THz imaging // Proc. SPIE. Vol. 6212. Pp. 270 – 278.
79. Bessemoulin A., Grunenputt J., Fellon P. et al. Coplanar W-band low noise amplifier MMIC using 100-nm gate-length GaAs PHEMTs // 34th European Microwave Conference. Amsterdam: 2004.
80. Kärkkäinen M., Varonen M., Kantanen M. et al. Low noise amplifiers for 94 GHz Cloud Radar // 12th GAAS© Symposium. Amsterdam: 2004. Pp. 411 – 414.
81. <http://www.farran.com/>.
82. <http://www.thruvision.com>.
83. Финкель М. И., Масленников С. Н., Гольцман Г. Н. Концепция приёмного комплекса космического радиотелескопа «Миллиметрон» // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 10-11. С. 924–934.
84. Gompf B., Gerull M., Muller T., Dressel M. THz-micro-spectroscopy with backward-wave oscillators // Infrared Phys. & Techn. 2006. Vol. 49. P. 128 – 132.
85. Mehdi I., Schlecht E., Chattopadhyay G., Siegel P. H. THz local oscillator sources: Performance and capabilities // Proc. SPIE. 2003. Vol. 4855. P. 435 – 446.
86. Eisele H., Kamoua R. Submillimeter-wave InP Gunn devices // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2004. Vol. 52. P. 2371 – 2378.
87. Eisele H. Superlattice and other negative-differential resistance devices: Current status // Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects / Ed. by R.E. Miles, X.-C. Zhang, H. Eisele, A. Krotkus. Springer, Netherlands, 2007. Pp. 69 – 88.
88. <http://virginiadiodes.com/multipliers.php>.
89. Faist J., Capasso F., Sirtori C. et al. Quantum cascade lasers. Intersubband transitions in quantum wells. Physics and device applications // Semiconductors and Semimetals / Ed. by H. Liu, F. Capasso. Academic Press, New York, 2000. Pp. 1 – 83.

90. Walther C., Fischer M., Scalari G. et al. Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 91, no. 131122.
91. Williams B. S. Terahertz quantum cascade lasers // *Nature Photon.* 2007. no. 1. P. 517 – 525.
92. Belkin M.A., Fan M.J., Hormoz S. et al. Terahertz quantum cascade lasers with copper metal-metal waveguides operating up to 178 K // *Opt. Express.* 2008. no. 16. P. 3242 – 3248.
93. Koshelets V. P., Shitov S. V., Filippenko L. V., et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1996. Vol. 68. P. 1273.
94. Ryabchun S. A., Tretyakov I. V., Finkel M. I. et al. Fabrication and characterisation of NbN HEB mixers with in situ gold contacts // *Proc. 19th international symposium on space terahertz technology.* Groningen, Netherlands: 2008. Pp. 62 – 67.
95. Weinreb Sander, Wadefalk Niklas. Very Low Noise Amplifiers for Radio Astronomy and Space Communications. IEEE 2005 MTTS Workshop WFF.
96. <http://www.lownoisefactory.com>.
97. Ожегов Р. В., Гронский П. В., Муратова Т. В. Система сбора данных на микросхемах Analog Devices. // *Приборы и техника эксперимента.* 2008. № 3. С. 177–179.
98. Ожегов Р. В., Окунев О. В., Гольцман Г. Н. Флуктуационная чувствительность сверхпроводящего болометрического смесителя на эффекте разогрева электронного газа. // *Радиотехника.* 2009. № 3. С. 120–125.
99. Ожегов Р. В., Горшков К. Н., Окунев О. В., Гольцман Г. Н. Сверхпроводниковый смеситель на эффекте электронного разогрева как элемент матрицы системы построения тепловых изображений. // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36, № 21. С. 70–77.
100. Ожегов Р. В., Морозов Д. В., Масленников С. Н. и др. Тепловизор субмиллиметрового диапазона длин волн для регистрации теплового излучения человека и обнаружения скрытых под одеждой предметов. // *3-я Международная выставка и конференция "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности".* 2004. — 17-19 марта. С. 2.51.

101. Ожегов Р. В., Масленников С. Н., Морозов Д. В. и др. Тепловизор субмиллиметрового диапазона длин волн. // Десятая Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых. 2004. — 1-7 апреля. С. 971–973.
102. Maslennikov S. N., Morozov D. V., Ozhegov R. V. et al. Imaging system for submillimeter wave range based on AlGaAs/GaAs hot electron bolometer mixers. // The Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves. 2004. — 21-26 June. Pp. 558–560.
103. Морозов Д. В., Смирнов К. В., Ожегов Р. В. и др. AlGaAs/GaAs смеситель на основе эффекта разогрева двумерных электронов для тепловизора субмиллиметрового диапазона. // Пятая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике.
104. <http://www.eccosorb.com>.
105. Goltsman Gregory N., Vachtomin Yuriy B., Antipov Sergey V. et al. NbN phonon-cooled hot-electron bolometer mixer for terahertz heterodyne receivers // Proc. SPIE, Vol. 5727. 2005. Pp. 95 – 106.
106. Ryabchun Sergey, Tong Cheuk-Yu Edward, Blundell Raymond, Gol'tsman Gregory. Stabilization Scheme for Hot-Electron Bolometer Receivers Using Microwave Radiation // IEEE Transactions on applied superconductivity. Vol. 19, no. 1.
107. Ryabchun Sergey, Tong Cheuk-Yu Edward, Paine Scott et al. Temperature Resolution of an HEB Receiver at 810 GHz // IEEE Transactions on applied superconductivity. Vol. 19, no. 3.
108. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2006.
109. Тимановский А. Л. Сверхразрешение в системах пассивного радиовидения: Кандидатская диссертация / Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. 2007.
110. Ожегов Р. В., Окунев О. В., Гольцман Г. Н. и др. Флуктуационная чувствительность сверхпроводящего интегрального приемника терагерцового диапазона частот. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, № 6. С. 750–755.

111. Ozhegov R. V., Gorshkov K. N., Goltsman G. N. et al. Stability of terahertz receiver based on superconducting integrated receiver. // *Superconducting Science and Technology*. 2011. no. 24. P. 035003.
112. Ожегов Р. В., Горшков К. Н., Гольцман Г. Н. и др. Флуктуационная чувствительность и временная нестабильность сверхпроводникового интегрального приемника для тепловизора терагерцового диапазона. // Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике / Научная сессия НИЯУ МИФИ. Москва: 2011. С. 144–145.
113. Ожегов Р. В., Горшков К. Н., Смирнов К. В. и др. Терагерцевый тепловизор на базе сверхпроводящего интегрального приемника для применений в системах безопасности. // *Прикладная сверхпроводимость 2010*. Москва: 2010. — 23 марта.
114. Ozhegov R. V., Gorshkov K. N., Smirnov K. V. et al. Terahertz Imaging System based on Superconducting Integrated Receiver. // SET-159 Specialists Meeting on "Terahertz and Other Electromagnetic Wave Techniques for Defence and Security". Vilnius, Lithuania: 2010. — 3-4 May.
115. Josephson B. D. Possible new effects in superconducting tunneling // *Phys. Rev. B*. 1962. Vol. 1. P. 251.
116. Koshelets Valery P., Ermakov Andrey B., Filippenko Lyudmila V. et al. Superconducting Integrated Submillimeter Receiver for TELIS // *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* 2007. Vol. 17.
117. de Lange Gert, Boersma Dick, Dercksen Johannes et al. Development and Characterization of the Superconducting Integrated Receiver Channel of the TELIS Atmospheric Sounder // *Supercond. Sci. Technol.* 2010. Vol. 23. 045016 (8pp).
118. Benford D. J., Gaidis M. C., Kooi J. W. Transmission properties of Zr-tex in the infrared to submillimeter // *Proceedings of Tenth International Symposium on Space Terahertz Technology*. Charlottesville: 1999. — March. Pp. 405 – 413.
119. Lamb James W. Miscellaneous data on materials for millimeter and submillimeter optics // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1996. Vol. 17, no. 12. Pp. 1997–2033.
120. Allan D. Statistics of Atomic Frequency Standards // *Proceedings of IEEE*. 1966. — February. Vol. 54, no. 2. Pp. 221–230.

**Р. В. Ожегов, К. Н. Горшков, О. В. Окунев, Г. Н. Гольцман, В. П. Кошелец,
Л. В. Филиппенко, Н. В. Кинёв**

**Флуктуационная чувствительность и
стабильность приемников с СИС и НЕВ
смесителями для терагерцового тепловидения**

Монография

Управление издательской деятельности
и инновационного проектирования
МПГУ
119571 Москва, Вернадского пр-т, д. 88, оф. 446
Тел.: (499) 730-38-61
E-mail: izdat@mpgu.edu

Подписано в печать 11.09.2014.
Формат 60x90/16. Объем 6,5 п.л.
Тираж 500 экз. Заказ № 360.

ISBN 978-5-4263-0192-4

