

На правах рукописи



ОЖЕГОВ Роман Викторович

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

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на кафедре общей и экспериментальной физики факультета физики и информационных технологий Московского педагогического государственного университета.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор,
Гольцман Григорий Наумович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, Пирогов Юрий Андреевич
кандидат физико-математических наук,
Соболев Александр Сергеевич

Ведущая организация: Учреждение Российской академии наук
Институт физики микроструктур РАН

Защита состоится «19» декабря 2011 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.154.22 при Московском педагогическом государственном университете, расположенном по адресу: 119435, Москва, ул. М. Пироговская, д. 29, ауд. 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского педагогического государственного университета по адресу: 119435, Москва, ул. М. Пироговская, д. 1.

Автореферат разослан «___» _____ 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Васильева И. А.

Общая характеристика работы

Современные приемники терагерцового (ТГц) диапазона частот предельной чувствительности разрабатывались в основном для астрономических применений в рамках крупных международных проектов. Результатом проведенных исследований стали такие проекты как TELIS – телескоп баллонного базирования, HERSHEL – телескоп спутникового базирования, Sophia – телескоп самолетного базирования, Миллиметрон – отечественный амбициозный проект, направленный на создание уникального радиотелескопа, использующего наиболее чувствительные болометрические и гетеродинные приемники гигагерцового, терагерцового, среднего ИК диапазонов, и интерферометра со сверхбольшой базой, основанного на этом радиотелескопе. В настоящее время приемники и источники ТГц диапазона частот достигли уровня высокого качества и достаточно низкой себестоимости производства, что делает их более доступными для широкого круга задач.

Одной из важнейших задач является задача построения радиоизображений в ТГц диапазоне частот. Системы построения радиоизображений могут применяться во многих областях от медицины и систем безопасности до навигации в условиях плохой видимости. Сложность работы в ТГц диапазоне частот связана с так называемой "терагерцовой ямой" (THz gap) [1]: мощность источников излучения падает при приближении к терагерцовому диапазону частот как со стороны радиочастот так и со стороны ИК диапазона.

С точки зрения приемников этот диапазон также имеет свои особенности. Полупроводниковые приемники, прекрасно работающие как в радио-, так и в ИК диапазонах оказываются не столь качественными для использования их в терагерцовом диапазоне. Наиболее чувствительными приемниками терагерцового излучения, являются сверхпроводящие приемники [1].

Несмотря на то, что системы построения изображений радиодиапазона, терагерцового диапазона частот и ИК диапазона используют в своей работе общие принципы, системы терагерцового диапазона частот обладают специфическими преимуществами по сравнению со своими аналогами. 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, 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 диапазо-

на. Терагерцовое излучение, занимая пограничное положение между радио- и ИК диапазонами, обладает высокой проникающей способностью, сохраняя при этом высокое пространственное разрешение, что делает их наиболее привлекательными при проектировании систем радиовидения и, в частности, систем безопасности.

Актуальность исследования. В настоящее время существует большое количество разнообразных систем радиовидения, как СВЧ, так и ИК диапазонов [2]. Они обладают хорошими характеристиками и широко востребованы. Однако, при всем существующем многообразии, они не решают целый ряд задач, которые в принципе могут быть решены с помощью приборов терагерцового диапазона частот. Среди систем радиовидения терагерцового диапазона наиболее развитыми в настоящее время являются активные системы построения радиоизображений. В этом случае объект наблюдения облучается терагерцовым излучением и принимается отраженный от объекта или прошедший сквозь него сигнал. Все разнообразие активных систем можно разбить на активную систему радиовидения, использующую импульсный источник зондирующего сигнала [3, 4]; активную систему радиовидения, использующую приемник прямого детектирования при непрерывном источнике зондирующего сигнала [5, 6], и супергетеродинную активную систему радиовидения [7].

Однако, в ряде случаев использование активных систем невозможно или затруднено, например, для обеспечения скрытного наблюдения, когда необходимо использовать пассивные системы радиовидения. Пассивные системы радиовидения можно разделить на системы, использующие приемник прямого детектирования [8], и системы, использующие супергетеродинный приемник. Супергетеродинный приемник, несмотря на большую сложность по сравнению с приемником прямого детектирования, обладает рядом существенных преимуществ: во-первых, помимо амплитуды сигнала он позволяет получать информацию и о фазе сигнала, что может быть существенно при анализе изображения; во-вторых, супергетеродинный приемник получает информацию как спектрометр высокого разрешения, что может быть использовано для определения химического состава наблюдаемых объектов, и, в-третьих, фазовая информация позволяет строить трехмерные изображения наблюдаемых объектов [9].

В настоящее время наиболее чувствительными супергетеродинными приемниками терагерцового диапазона частот, являются приемники, основанные на СИС смесителях. Наиболее значимым достижением последних лет, связанным с этим приемником, является создание сверхпроводящего интегрального

приемника (СИП), объединяющего высокочувствительный СИС смеситель и FFO гетеродин [10]. Обладая высокой чувствительностью, он имеет частотный диапазон ограниченный сверху энергетической щелью сверхпроводника. Для работы на более высоких частотах необходимо использовать в качестве смесительного элемента смеситель на горячих электронах (НЕВ смеситель).

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.

Целью настоящей диссертационной работы является исследование флуктуационной чувствительности 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.

Научная новизна Приемники и источники терагерцевого диапазона частот активно развиваются в настоящее время многими научными группами. Наиболее важной характеристикой терагерцевых приемников в теплови-

зионных 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 достижения 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.

Практическая значимость. Результаты работы 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.

В ходе работы были получены следующие **научные результаты**:

1. Впервые исследована флуктуационная чувствительность терагерцевого супергетеродинного приемника на основе НЕВ смесителя;
2. Впервые исследована флуктуационная чувствительность сверхпроводящего интегрального приемника, в котором объединены СИС смеситель и генератор гетеродина FFO.
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 флуктуационной чувствительности терагерцевых тепловизоров.
4. Разработана и опробована методика увеличения временной стабильности приемника с помощью математической обработки выходного сигнала.
5. С помощью разработанных приемников получены тепловые изображения в терагерцевом диапазоне частот, продемонстрировано влияние пре-

пятствий на качество изображения, а также разработаны требования к возможности получения тепловых изображений за препятствиями.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Предельно достижимое значение флуктуационной чувствительности пассивного супергетеродинного приемника на базе сверхпроводящего интегрального приемника, в котором объединены СИС смеситель и гетеродин FFO определяется в основном радиояркостной температурой фона. На частоте 500 ГГц, при полосе тракта ПЧ 4 ГГц, постоянной времени 1 с предельная флуктуационная чувствительность составляет 13 ± 2 мК и 10 ± 1 мК при шумовой температуре приемника 170 К и 90 К соответственно.
2. Флуктуационная чувствительность супергетеродинного приемника на базе НЕВ смесителя не превышает 0.5 К на частоте 300 ГГц при шумовой температуре 2000 К, полосе тракта ПЧ 200 МГц и постоянной времени 1 с.
3. Использование цифровых способов корректировки сигнала позволяет существенно увеличить временную стабильность приемника без использования сложного измерительного оборудования. В полосе ПЧ 4 ГГц использование корректировки сигнала позволяет увеличить время Алана более чем на порядок до значения в 5 с.

Апробация работы. Основные результаты, изложенные в диссертации докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях: Пятая Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике; 3-я Международная выставка и конференция "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности"; Десятая Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых; The Fifth International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves; "Прикладная сверхпроводимость 2010"; SET-159 Specialists Meeting on "Terahertz and Other Electromagnetic Wave Techniques for Defence and Security"; Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике. Результаты работы неоднократно докладывались и обсуждались на научных семинарах учебно-научного радиофизического центра Московского педагогического государственного университета.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 12 работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [А1, А2, А3, А4, А5], 4 статьи в сборниках трудов конференций [А6, А7, А8, А9].

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Творческий вклад автора выразился в формулировке задач, разработке экспериментальных методик и создании измерительных установок, в проведении экспериментов, планировании и проведении комплексных экспериментов и обработке результатов измерений, в участии в обсуждении и анализе полученных результатов, написании статей и конкурсных проектов. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был определяющим. Все представленные в диссертации результаты получены лично автором.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка публикаций автора и библиографии. Общий объем диссертации 132 страницу, из них 116 страниц текста, включая 46 рисунков и 2 таблицы. Библиография включает 113 наименований на 12 страницах.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, аргументирована научная новизна, показана практическая значимость полученных результатов, описываются основные научные результаты работы 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. Глава состоит из четырех разделов и носит обзорный характер.

В первом разделе рассмотрены основные применения систем радиовидения радио- и ИК диапазонов. Среди наиболее значимых выделены применения систем радиовидения в медицине, службах безопасности для выявления скрытого под одеждой оружия и навигации в условиях плохой видимости.

Во втором разделе рассмотрены примеры построения активных систем радиовидения: активную систему радиовидения, использующую импульсный

источник зондирующего сигнала; активную систему радиовидения, использующую приемник прямого детектирования при непрерывном источнике зондирующего сигнала, и супергетеродинную активную систему радиовидения.

В третьем разделе рассмотрены основные физические принципы построения пассивных систем радиовидения, основанных на приемнике прямого детектирования и супергетеродинном приемнике. Сделан вывод о том, что несмотря на схожую предельную чувствительность приемника прямого детектирования и супергетеродинного приемника последний обладает преимуществом при изучении узких характеристических линий наблюдаемых объектов, а значит существует возможность использования его для определения материала, из которого изготовлен объект наблюдения. Помимо этого супергетеродинный приемник также получает информацию о фазе сигнала, что может быть использовано для получения трехмерного изображения объекта наблюдения [9]. Основным недостатком супергетеродинного приемника при сравнении его с приемником прямого детектирования является его сложность.

Для супергетеродинного приемника в случае большого сигнала флуктуационная чувствительность определяется в соответствии с формулой [11]:

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

здесь ΔT_H — флуктуационная чувствительность супергетеродинного приемника, T_R — шумовая температура приемного устройства, T_S — радиояркость температура 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 и зависит от выбора схемы приемника. Выражение $1/\sqrt{B_H \tau}$ принято называть радиометрическим выигрышем, и обозначать через q .

Наиболее часто в литературе встречается другая формула, являющаяся частным случаем формулы (1) в пределе, когда шумовая температура приемника существенно превышает радиояркость температуру наблюдаемого объекта.

$$\Delta T_H = \alpha \frac{T_R}{q}. \quad (2)$$

В четвертом разделе производится выбор объектов исследования. Анализ литературы выявил отсутствие работ по созданию пассивных систем радиовидения субмиллиметрового и терагерцевого диапазона частот, основан-

ных на супергетеродинных приемниках. В качестве основной задачи при работе над диссертационным исследованием была поставлена задача разработки отдельных узлов супергетеродинного тепловизора терагерцового диапазона частот, а также исследование их характеристик и разработка методов достижения предельных характеристик приемника.

В качестве объектов исследования были выбраны два приемника, демонстрирующие в настоящее время наилучшие характеристики как супергетеродинные приемники субмиллиметрового и терагерцового диапазона частот. Речь идет о НЕВ смесителе (от англ. hot electron bolometer mixer – смеситель на эффекте электронного разогрева в сверхпроводящих пленках) и СИП (сверхпроводящий интегральный приемник на базе смесителя на квазиэластичной нелинейности туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник (СИС смеситель) и интегрированного с ним гетеродина FFO (от англ. flux flow oscillator – генератор на вязком течении джозефсоновских вихрей)).

В качестве основной задачи при работе над диссертационным исследованием была поставлена задача исследования флуктуационной чувствительности разработанных и изготовленных лабораторных макетов супергетеродинных тепловизоров, и достижение предельных значений флуктуационной чувствительности приемников, увеличение временной стабильности макетов и получение тепловых терагерцовых изображений различных объектов.

Во второй главе "Смеситель на эффекте электронного разогрева в тонких сверхпроводящих пленках как чувствительный элемент пассивного супергетеродинного тепловизора терагерцового диапазона частот" 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. Глава состоит из пяти разделов. Основные результаты второй главы опубликованы в работах [А1, А3, А4, А6, А7, А8] .

В первом разделе главы производится описание методик измерения флуктуационной чувствительности приемника, а также описывается лабораторный макет пассивного супергетеродинного тепловизора на базе НЕВ смесителя с использованием лампы обратной волны диапазона 300 ГГц в качестве гетеродина.

Во втором разделе главы приводятся экспериментальные результаты и методы достижения предельных значений флуктуационной чувствительности для лабораторного макета пассивного супергетеродинного тепловизора на базе НЕВ смесителя. Анализ процессов детектирования сигнала позволил

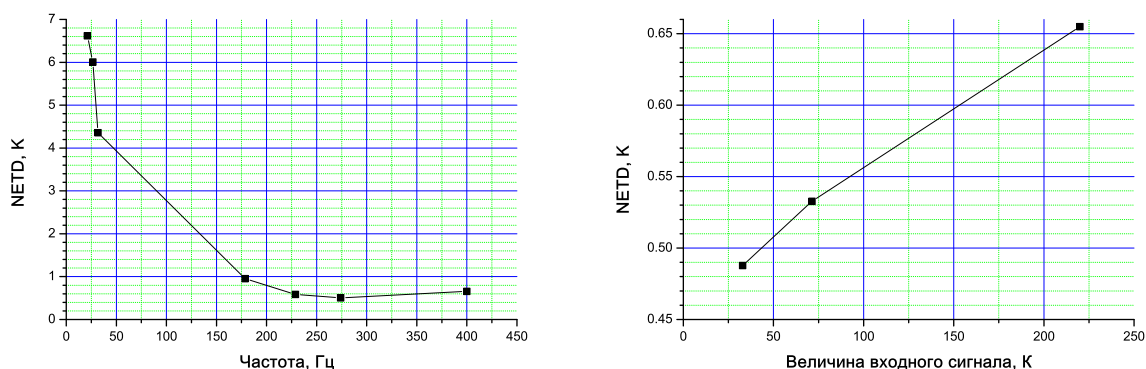


Рис. 1. Слева: зависимость флуктуационной чувствительности приемника от частоты модуляции сигнала. Справа: зависимость флуктуационной чувствительности приемника от величины входного сигнала. За величину входного сигнала принимается разность физических температур нагрузки и лопастей обтюратора.

получить простую методику достижения предельной флуктуационной чувствительности.

Основным источником паразитных флуктуаций для данного лабораторного макета являлась нестабильности гетеродина (нестабильность его мощности). Нестабильность мощности гетеродина проникает в выходной сигнал приемника, поскольку коэффициент преобразования приемника является зависимым от падающей мощности гетеродина. Спектр нестабильности мощности гетеродина является непрерывным, однако влияние на выходной сигнал оказывают только два участка спектра: вблизи частоты модуляции сигнала и вблизи нуля частот.

Для устранения первого вклада необходимо увеличить частоту модуляции сигнала, поскольку обычно спектр нестабильностей мощности гетеродина имеет природу фликкер-шума и его плотность спадает с увеличением частоты. Влияние увеличения частоты модуляции сигнала на флуктуационную чувствительность показано на рисунке 1 (слева). Данные приведены для приемника Thermovision#6 с шумовой температурой 2000 K на частоте гетеродина 300 ГГц, полоса тракта ПЧ составляла 200 МГц.

Оказалось, что нестабильности мощности гетеродина вблизи нуля частот проникают в выходной сигнал пропорционально величине входного сигнала, т.е. пропорционально разности яркостных температур между объектом наблюдения и лопастями обтюратора. Для устранения этого вклада необходимо уменьшить величину входного сигнала. Влияние уменьшения флуктуационной чувствительности приемника при уменьшении величины входного сигнала

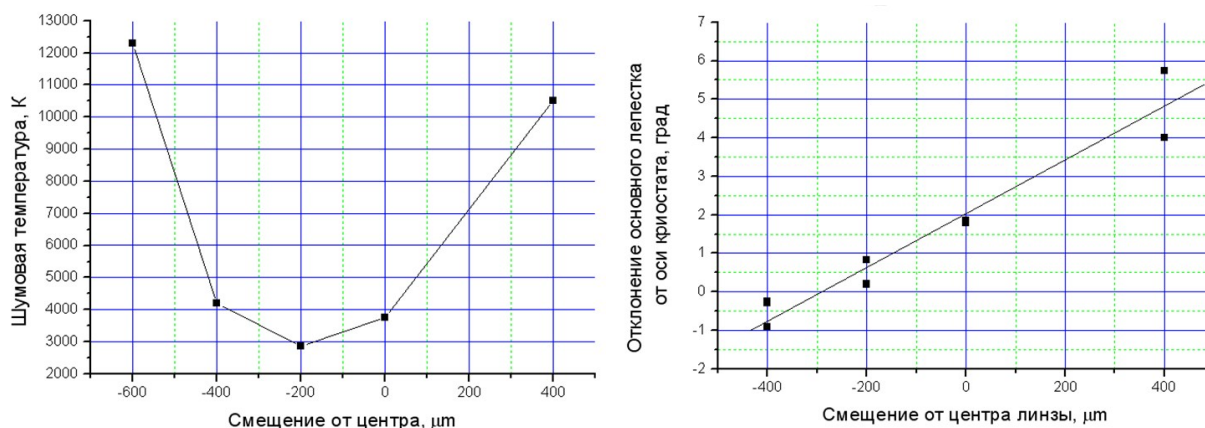


Рис. 2. Влияние положения смесителя на линзе на его характеристики. Слева – зависимость шумовой температуры от смещения смесителя от центра линзы (погрешность измерения шумовой температуры не превышает 10%). Справа – зависимость отклонения основного лепестка диаграммы направленности смещения смесителя 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.

ла представлено на рисунке 1 (справа).

В третьем разделе главы проводится анализ зависимости влияния положения чипа смесителя на линзе на его шумовые характеристики, а также на его диаграмму направленности. Измерения проводились с приемником Thermovision#2. Была проведена серия измерений шумовой температуры приемника при различных положениях смесителя относительно центра линзы. Измерения проводились методом Y-фактора, при этом на оптическом входе приемника поочередно помещались согласованные нагрузки комнатной и азотной температуры.

Как видно из рисунка 2 (слева) 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. На рисунке 2 представлены результаты измерений зависимо-

сти 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 соответствует теоретическим предсказаниям.

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 . 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, возможно создание матричного приемника, позволяющего 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 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.

В четвертом разделе главы приводятся некоторые терагерцовые изображения объектов, полученных с помощью разработанного лабораторного макета. В качестве объекта наблюдения использовалась палочка, выполненная из материала, близкого к абсолютно черному телу в терагерцовом диапазоне частот. В качестве фона использовалась нагрузка, выполненная из того же материала с температурой близкой к температуре кипения жидкого азота.

Установка позволяла получать изображения объекта скрытое за различными препятствиями. Для этого температура фона должна соответствовать температуре тела человека, а перед объектом необходимо поместить препятствие моделирующее одежду, или другие возможные помехи. На рисунке 3 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

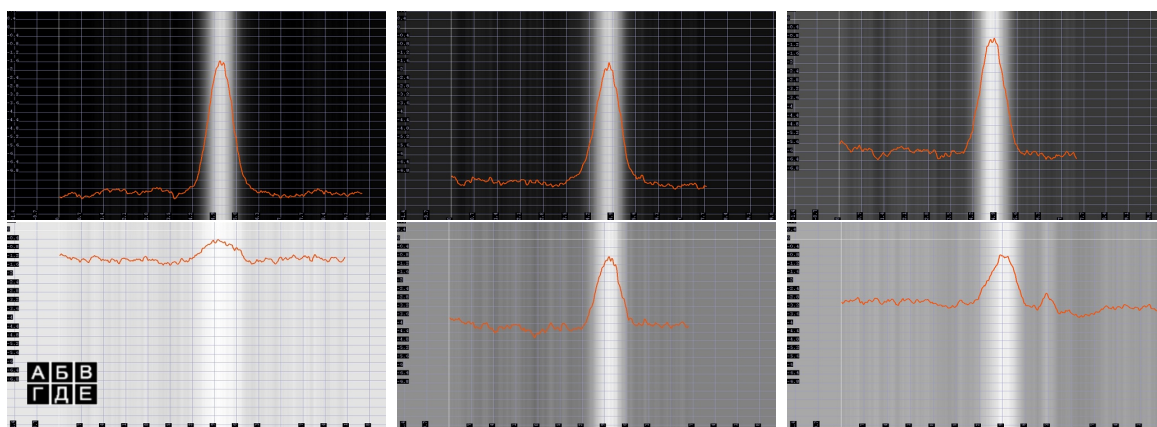


Рис. 3. Влияние препятствий на качество изображений. Представлены изображения вертикальной палочки, цветом в градациях серого показана радиояркостная температура (для наглядности изображение представлено в инверсии, то есть более нагретые объекты соответствуют более темным областям). Линией показаны 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).

изображений видно, что хлопчатобумажная ткань не представляет преграду для получения качественного изображения. Фанера является существенным препятствием для получения изображений, в противовес пластику.

Также в разделе представлены коэффициенты пропускания различных материалов, из которых обычно изготавливается одежда, в диапазоне частот 150-300 ГГц.

В пятом разделе даются выводы к главе и приводятся основные результаты главы. В 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 ~ 300 ГГц при постоянной времени 1 с, ширине полосы промежуточных частот 200 МГц и шумовой температуре приемника ~ 2000 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.

В третьей главе "Сверхпроводниковый интегральный приемник как чувствительный элемент пассивного супергетеродинного тепловизора тера-

герцового диапазона частот” изложены результаты исследования лабораторного макета терагерцового тепловизора на базе сверхпроводниковый интегрального приемника, а также обсуждаются полученные характеристики лабораторного макета. Глава состоит из шести разделов. Результаты третьей главы опубликованы в работах [A2, A5, A9] .

В первом разделе главы описан объект исследования: сверхпроводящий интегральный приемник, в котором интегрированы малощумящий терагерцовый смеситель на квазичастичной нелинейности перехода сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник, высокостабильный гетеродин, управляемый напряжением и гармонический смеситель, предназначенный для организации линии фазовой автоподстройки частоты гетеродина.

Во втором разделе главы приводится описание лабораторных макетов пассивного супергетеродинного тепловизора на базе сверхпроводящего интегрального приемника, использованных для исследования флуктуационной чувствительности приемника.

В третьем разделе главы приводятся экспериментальные результаты исследования флуктуационной чувствительности для лабораторного макета пассивного супергетеродинного тепловизора на базе сверхпроводящего интегрального смесителя. Зависимость флуктуационной чувствительности приемника от его шумовой температуры представлена на рисунке 4. Определяющими флуктуационную чувствительность приемника в случае сверхпроводящего интегрального приемника являются флуктуации температуры объекта наблюдения. Кривыми показаны значения предельной флуктуационной чувствительности, вычисленные по формулам 1 и 2.

Погрешность измерения флуктуационной чувствительности определялась

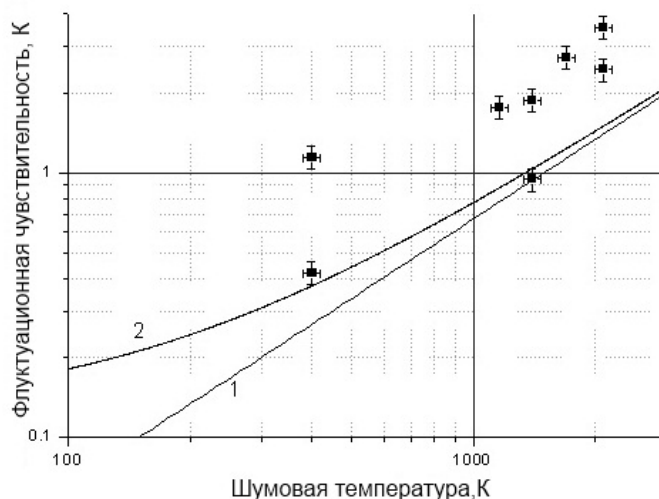


Рис. 4. Зависимость флуктуационной чувствительности приемника от его шумовой температуры. Точками представлены экспериментальные значения, кривые — теоретический расчет (выражения 1 и 2). Обе кривые построены при $q = 1.4 \cdot 10^4$ (ширина полосы усиления тракта промежуточной частоты $B_H = 200$ МГц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

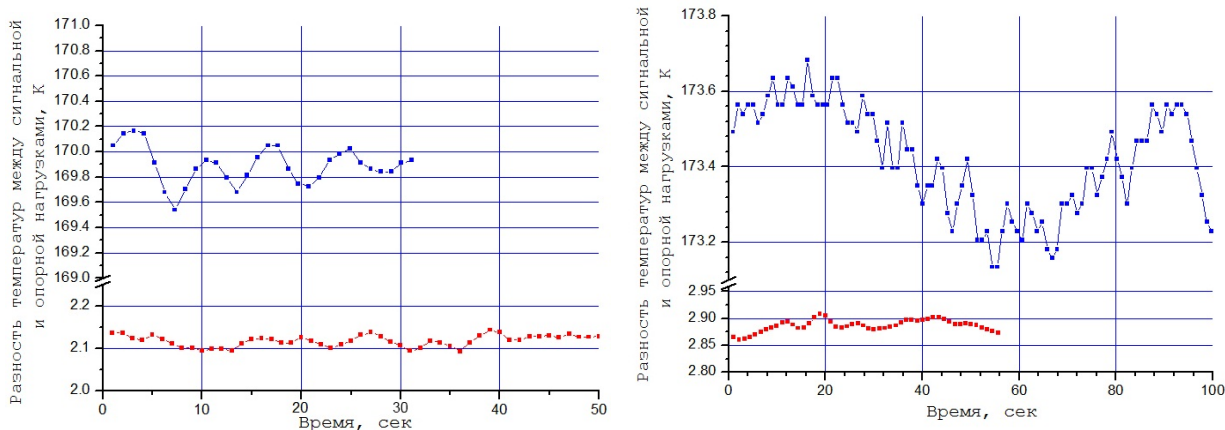


Рис. 5. Временные зависимости выходного сигнала синхронного усилителя при разных величинах входного сигнала. В качестве величины входного сигнала считалась разница физических температур нагрузки и лопастей механического обтюратора. Слева приведены зависимости выходного сигнала для образца T4m-093#11m (минимальное значение флуктуационной чувствительности $\Delta T_H = 13 \pm 2\text{мК}$), справа – аналогичные характеристики для приемника T4m-093#6m (минимальное значение флуктуационной чувствительности $\Delta T_H = 10 \pm 1\text{мК}$).

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. В случае больших шумовых температур вообще было невозможно уменьшить входной сигнал так, чтобы было возможным достигнуть предельной флуктуационной чувствительности приемника. Однако, в ряде случаев достижение предельной флуктуационной чувствительности было возможно, что и продемонстрировано приведенным графиком. При этом кривая (2) служит предельным случаем, ниже которого значений флуктуационной температуры быть не могут.

Временные зависимости выходного сигнала приемника от величины входного сигнала показаны на рисунке 5. На частоте 500 ГГц, при полосе тракта ПЧ 4 ГГц, постоянной времени 1 с предельная флуктуационная чувствительность составляет $13 \pm 2\text{мК}$ и $10 \pm 1\text{мК}$ при шумовой температуре приемника 170 К (для приемника T4m-093#11m) и 90 К (для приемника T4m-093#6m) соответственно.

Помимо этого в разделе обсуждаются вопросы необходимой стабильности источника смещения приемника и выводятся критерии стабильности ис-

точника смещения. Критическим значением стабильности напряжения смещения является значение ~ 1 мкВ.

В четвертом разделе обсуждаются способы повышения стабильности приемника. Анализ времени стабильности приемника проводился в терминах вариации Аллана [12]. Для увеличения времени Аллана системы была предложена цифровая корректировка сигнала. Для коррекции изменения коэффициента преобразования приемника использовалось 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). Время переключения зеркала из одного положения в другое составляло около 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 сигнала опорной нагрузки. Для измерений в реальном времени удобно использовать следующее корректировочное выражение:

$$S'_{OUT_i} = \frac{S_{OUT_i}}{S_{REF_i}} S_{REF_0}, \quad (3)$$

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 6 представлена вариация Аллана для опорного сигнала, полезного сигнала и скорректированного в соответствии с выражением 3. Флуктуации скорректированного сигнала при малых временах интегрирования больше, чем флуктуации каждого из измеряемых сигналов, в соответствии

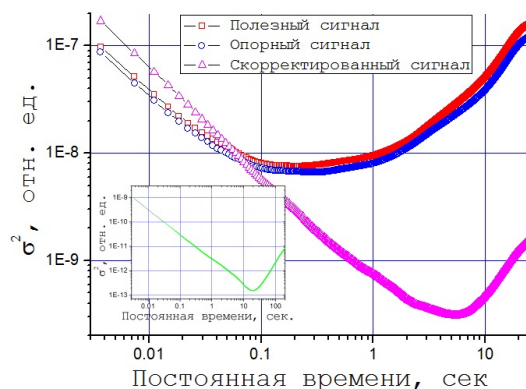


Рис. 6. Вариация Аллана для опорного, полезного сигнала и скорректированного сигналов при ширине полосы тракта ПЧ 4 ГГц, на вставке представлен результат корректировки сигнала в случае ширины полосы тракта ПЧ 40 МГц.



Рис. 7. Терагерцовое изображение тестового объекта «звезда» и его изображение в оптическом диапазоне.

с выражением $\sqrt{\sigma_{REF}^2 + \sigma_{OUT}^2}$. На графике видно, что использование коррекционной 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 6 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.

Пятый раздел главы посвящен получению терагерцовых изображений. На рисунке 7 представлено фотоизображение и терагерцовое изображение тестового объекта "звезда", полученное с помощью лабораторного макета тепловизора, изготовленного на базе супергетеродинного интегрального приемника. Изображение получено перемещением объекта в 2-х взаимоперпендикулярных направлениях.

В Заключение сформулированы основные результаты работы: В ходе выполнения диссертационной работы получены 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. К сожалению в данной работе не приведены результаты работы автора с НЕВ смесителями на частотах выше

1 ТГц. Имеющиеся в распоряжении автора 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.

Полученные 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, и сотрудником которой является автор диссертации, основываясь на результатах диссертационного исследования, проводит разработку прототипа пассивного терагерцового тепловизора диапазона 500–600 ГГц на основе сверхпроводящего интегрального приемника.

Список публикаций

- A1. 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. - 0.2 п.л. (авторский вклад 70%).)
- A2. Ожегов Р. В., Окунев О. В., Гольцман Г. Н., Филиппенко Л. В., Кошелец В. П. Флуктуационная чувствительность сверхпроводящего интегрального приемника терагерцового диапазона частот. // Радиотехника и электроника. 2009. Т. 54, №6, С. 750–755. - 0.4 п.л. (авторский вклад 70%).
- A3. 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. - 0.4 п.л. (авторский вклад 80%).
- A4. 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. - 0.5 п.л. (авторский вклад 70%).
- A5. Ozhegov R. V., Gorshkov K. N., Gol'tsman G. N., Kinev N. V., Koshelets V. P. Stability of terahertz receiver based on superconducting

integrated receiver. // Superconducting Science and Technology. 2011. no. 24. P. 035003. - 0.25 п.л. (авторский вклад 60%).

- A6. Ожегов Р. В., Морозов Д. В., Масленников С. Н., Смирнов К. В., Окунев О. В. и Гольцман Г. Н. 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. - 0.06 п.л. (авторство не разделено).
- A7. Ожегов Р. В., Масленников С. Н., Морозов Д. В., Окунев О. В., Смирнов К. В., Гольцман Г. Н. Тепловизор субмиллиметрового диапазона длин волн. // Десятая Всероссийская конференция студентов-физиков и молодых ученых. 2004.– 1-7 апреля 2004г. С. 971–973. - 0.13 п.л. (авторство не разделено).
- A8. Maslennikov S. N., Morozov D. V., Ozhegov R. V., Smirnov K. V., Okunev O. V., Gol'tsman G. N. 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. - 0.13 п.л. (авторство не разделено).
- A9. Ожегов Р. В., Горшков К. Н., Гольцман Г. Н., Кинев Н. В., Кошелец В. П. 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. - 0.13 п.л. (авторство не разделено).

Цитированная литература

1. Sisov F. THz radiation sensors // OPTO-ELECTRONICS REVIEW. 2010. Vol. 18, no. 1. Pp. 10–36.
2. Сизов Ф. Ф. Фотоэлектроника для систем видения в "невидимых" участках спектра. Киев: Академперіодика, 2008.

3. 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.
4. Karpowicz 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.
5. Kawase K., Ogawa Y., Minamide H., Ito H. Terahertz parametric sources and imaging applications // Semicond. Sci. Technol. 2005. no. 20. Pp. 258 — 265.
6. 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.
7. Hübers H.-W. Active Terahertz Imaging for Security (TeraSec). SRC 07, Berlin, 27.03.2007.
8. Luukanen A., Grossman E. N., Miller A. J. et al. An ultra-low noise superconducting antenna-coupled microbolometer with a room-temperature read-out // IEEE Microwave and wireless components letters. 2006. — August. Vol. 16, no. 8.
9. Гудмен Д. Введение в фурье-оптику. Москва: Мир, 1970.
10. Koshelets V. P., Shitov S. V., Filippenko L. V., et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. P. 1273.
11. Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н. Радиотелескопы и радиометры. Москва: Наука, 1973.
12. Allan D. Statistics of Atomic Frequency Standards // Proceedings of IEEE. 1966. — February. Vol. 54, no. 2. Pp. 221–230.