Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт прикладной астрономии
Российской академии наук

На правах рукописи

Зотов Максим Борисович

ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОМПАКТНОЙ АНТЕННЫ ПЕРЕДВИЖНОЙ РСДБ-СТАНЦИИ

Специальность 01.03.02 — «Астрофизика и звездная астрономия»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат физико-математических наук
Иванов Дмитрий Викторович

Санкт-Петербург – 2021

Оглавление

Введение ... 4
Глава 1. Передвижные РСДБ-станции ... 17
1.1 Обзор существующих передвижных РСДБ-станций и их приемных систем ... 17
1.2 Характеристики приемной системы радиотелескопа и их связь с параметрами радиоинтерферометра ... 26
1.3 Характеристики приемных систем комплекса «Квазар-КВО» ... 31
1.4 Оценка возможности использования компактных антенн для РСДБ-наблюдений с радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО» ... 37
1.5 Выбор антенной системы для передвижной РСДБ-станции ... 41
1.6 Выводы ... 49
Глава 2. Разработка приемной системы передвижной РСДБ-станции ... 51
2.1 Функциональная схема приемной системы ... 52
2.2 Облучатель и входной СВЧ-тракт ... 55
2.3 Блок приемный криостатируемый ... 63
2.4 Блок преобразования частоты ... 71
2.5 Блок генераторов шума ... 78
2.6 Размещение приемной системы на радиотелескопе РТ-4 ... 82
2.7 Выводы ... 85
Глава 3. Основные рабочие характеристики приемной системы передвижной РСДБ-станции ... 88
3.1 Шумовая температура ... 89
3.2 Параметры нелинейных искажений ... 95
3.3 Характеристики приемной системы в составе лабораторного макета радиоинтерферометра ... 105
3.4 Выводы ... 112
Глава 4. Первые наблюдения на радиотелескопе РТ-4 передвижной РСДБ-станции ... 113
4.1 Измерение шумовой температуры новой приемной системы радиотелескопа РТ-4 ... 114
4.2 Наблюдения на радиотелескопе РТ-4 в радиометрическом режиме ... 118
4.3 Результаты первых РСДБ-наблюдений ... 123
4.4 Выводы ... 127

Заключение 129
Список сокращений и условных обозначений 131
Список литературы 134
Приложение А 145

Введение

Актуальность работы

В настоящее время развитие радиоастрономии, которая решает многие фундаментальные и прикладные научные задачи, в значительной мере связано с совершенствованием аппаратуры и развитием методов радиоинтерферометрии. Астрофизика, астрометрия, небесная механика, космическая геодезия, координатно-временное обеспечение технических и специальных систем — далеко не полный список отраслей науки и техники, где используются результаты радиоинтерферометрических наблюдений.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) обеспечивает максимально доступное угловое разрешение, но для построения изображения радиоисточников, повышения эффективности наблюдений и решения астрометрических задач необходимы наблюдения на радиоинтерферометрах с базами различной длины и взаимного расположения. Поэтому дальнейшее развитие РСДБ идет по пути создания глобальных сетей, объединяющих радиотелескопы, расположенные в разных странах и на разных континентах. В настоящее время существует несколько постоянно действующих РСДБ сетей: американская система VLA, европейская EVN и российская система «Квазар-КВО», работающих как совместно с иностранными партнерами, так и автономно.

Комплекс «Квазар-КВО» решет задачи построения фундаментальных небесных и земных систем отсчета, определения и прогнозирования параметров вращения Земли, картографирования естественных радиоисточников с высоким угловым разрешением и т. д.

Основными вопросами создания новых и модернизации действующих сетей являются улучшение разрешающей способности РСДБ-сети и достижение максимальной чувствительности радиотелескопа. Очевидные пути реализации связаны с увеличением эффективной площади радиотелескопов, повышением отношения сигнал-шум и расширением полосы принимаемых частот, определяемой шириной рабочей полосы частот приемной системы и системой регистрации. Увеличения

отношения сигнал-шум целесообразно добиваться повышением чувствительности системы радиотелескоп-радиометр, прежде всего, за счет уменьшения собственных шумов приемной аппаратуры. Увеличение эффективной площади радиотелескопа ($A_{эфф}$) напрямую связано с увеличением геометрических размеров антенны и совершенствованием облучающей системы, что сказывается на стоимости изготовления. Улучшения разрешающей способности РСДБ-сети можно добиться изменением взаимного расположения элементов сети. Причем на основе анализа, приведенного в работе [1] и учитывая, что пары элементов (базы) можно комбинировать, комбинируя большие ($A_{эфф}\approx10^2\div10^3$ м^2) и весьма малые ($A_{эфф}\approx10$ м^2) антенны, можно получить гибкую сеть с практически любыми величинами и направлениями баз. Применение передвижных станций с радиотелескопами малого диаметра (концепция «мобильного» РСДБ) позволяет дополнительно расширить возможности такой сети в решении задач астрофизики и космической геодезии. При этом отношение сигнал-шум будет определяться большими радиотелескопами.

Стоит упомянуть актуальную задачу улучшения отечественной навигационной системы ГЛОНАСС — необходимость существенного уточнения опорной системы геоцентрических координат, опирающейся на пункты космической геодезической сети (КГС). Концепция «мобильного» РСДБ является одним из наиболее эффективных способов решения этой задачи. Данная концепция подразумевает уточнение координат пунктов КГС относительно опорных пунктов фундаментальных станций РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» с помощью передвижной РСДБ-станции.

Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» состоит из трех РСДБ-станций («Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары»). Все три станции входят в состав Международной РСДБ службы (IVS — International VLBI Service), ведут наблюдения по международным программам и участвуют в процессе уточнения опорных систем координат на небе (ICRF — International Celestial Reference Frame) и на поверхности Земли (ITRF — International Terrestrial Reference Frame), а также в непрерывном мониторинге параметров вращения Земли (ПВЗ) Между-

народной службой вращения Земли (IERS — International Earth Rotation Service). Начиная с 2005 года комплекс «Квазар-КВО» ведет самостоятельные регулярные РСДБ-наблюдения с целью определения параметров вращения Земли, в том числе оперативного определения всемирного времени для нужд отечественного координатно-временного и навигационного обеспечения (КВНО).

Однако возможности комплекса этим не ограничиваются. В системе «Квазар-КВО» с помощью передвижной РСДБ-станции доступны измерения показаний часов любого потребителя на поверхности Земли. Зарубежный опыт выполнения таких измерений показывает, что они могут выполняться с точностью порядка 0.1 нс по времени и 1 см по координатам [2, 3]. Несмотря на опыт применения концепции «мобильного» РСДБ в мире, в научной литературе практически не были освещены вопросы проектирования передвижной РСДБ-станции. В частности, оставались нерешенными вопросы разработки и применения криогенных приемных систем на компактных радиотелескопах передвижных РСДБ-станций.

Поэтому задача создания передвижной РСДБ-станции и включения ее в состав РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» с целью расширения возможностей комплекса в части решения задач астрофизики, космической геодезии, астрономии и улучшения наземной поддержки отечественной навигационной системы ГЛОНАСС является **актуальной**. Создание передвижной РСДБ-станции предполагает решение комплекса задач по созданию различных систем, таких как: антенная система, система регистрации, приемная система и другие. При этом стоит выделить вопрос создания специализированной высокочувствительной приемной системы (ПС), которая в совокупности с антенной системой будет определять чувствительность компактного радиотелескопа передвижной РСДБ-станции.

Малые размеры антенны передвижной станции накладывают значительные ограничения на приемную систему, в первую очередь на допустимый объем и массу аппаратуры, размещаемой на антенне. Подобные ограничения также влияют на выбор типа криогенной системы и микроохладителя (как наиболее массивного элемента). Компактная конструкция антенны передвижной станции не позволяет использовать длиннофокусные облучатели. При этом необходимо мини-

мизировать потери непосредственно перед охлаждаемыми входными усилительными каскадами для получения минимально возможных значений шумовой температуры системы.

Цели и задачи работы

Диссертационная работа направлена на решение важной научно-технической задачи расширения возможностей РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» в интересах астрофизики, космической геодезии и астрономии. **Цель диссертационной работы** — разработка и исследование высокочувствительной радиоастрономической приемной системы для реализации проекта создания передвижной РСДБ-станции, работающей в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Для достижения указанной цели решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ современного состояния работ по созданию приемных систем для передвижных РСДБ-станций и сформированы технические требования, предъявляемые к разрабатываемой приемной системе.
2. Проведено исследование возможностей минимизации вкладов отдельных узлов в шумовую температуру системы.
3. Разработан и изготовлен опытный образец приемной системы для передвижной РСДБ-станции.
4. Разработаны методики испытаний созданной приемной системы.
5. Проведены лабораторные исследования характеристик отдельных блоков и приемной системы в целом.
6. Проведены измерения параметров прототипа радиотелескопа передвижной РСДБ-станции с созданной приемной системой по наблюдениям эталонных источников.
7. Выполнены успешные РСДБ-наблюдения с участием прототипа передвижной РСДБ-станции в составе комплекса «Квазар-КВО» и проведен анализ результатов.

Научная новизна работы

1. Впервые в отечественной радиоастрономии создан инструмент для отработки принципов «мобильного» РСДБ. Созданная приемная система обеспечивает значение *SEFD*=18000 Ян для компактной антенны РТ-4 — прототипа передвижной РСДБ-станции, что соответствует характеристикам лучших мировых аналогов.

2. Впервые в Российской Федерации были проведены успешные РСДБ-наблюдения с использованием компактной антенны прототипа передвижной РСДБ-станции, оснащенной разработанной приемной системой. Полученные результаты подтверждают реализуемость концепции «мобильного» РСДБ в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», что позволит дополнительно расширить возможности комплекса в решении задач астрофизики и космической геодезии за счет лучшего заполнения UV-плоскости.

3. По результатам РСДБ-наблюдений с участием прототипа передвижной станции в составе комплекса «Квазар-КВО» получены трехмерные координаты передвижной станции с ошибкой порядка одного сантиметра.

4. Разработан ряд методик исследования рабочих характеристик конкретной приемной системы, предложен метод исследования параметров нелинейности разработанной радиоастрономической приемной системы.

Практическая ценность работы

1. Создана уникальная приемная система *X*-диапазона частот (8.2–9.1 ГГц) с криогенным охлаждением входных каскадов усиления, что обеспечило шумовую температуру приемной системы, приведенную ко входу 35 К (без облучателя и входного СВЧ-тракта — 15 К).

2. Разработаны облучатель и СВЧ-тракт оригинальной конструкции для антенной системы РТ-4, обеспечивающие прием сигналов от радиоисточников в заданной полосе частот (8.2–9.1 ГГц). Данный облучатель в совокупности с антенной системой РТ-4 обеспечивает коэффициент использования поверхности (*КИП*) не хуже 0.65.

3. В разработанной приемной системе использован охлаждаемый волноводный разделитель поляризаций, обеспечивающий минимизацию потерь во входном тракте. Это позволило получить шумовую температуру системы РТ-4 $T_{сис}$=55 К и значение коэффициента осевой эллиптичности входных трактов приемной системы менее 1 дБ во всем рабочем диапазоне частот.

4. Для размещения оборудования в подзеркальном пространстве было применено компьютерное моделирование. Разработана оригинальная конструкция подвеса приемной аппаратуры, обеспечивающая минимальную длину входных трактов и использование микрокриогенной системы (МКС) замкнутого цикла Джиффорда-МакМагона. Это дало возможность минимизировать шумовую температуру приемной системы в условиях ограничения по массе и габаритам.

5. Успешный опыт эксплуатации приемной системы на антенне РТ-4 в обсерватории «Светлое» показал правильность заложенных при проектировании технических решений. Кроме того данный опыт помог разработать особый подход к планированию РСДБ-наблюдений, характерный для компактных антенн передвижных РСДБ-станций.

Методическая и теоретическая основы исследования

В работе использованы аналитические методы исследования, численное моделирование, схемотехническая разработка и методы программирования в системах автоматизированного проектирования, а также аппарат теоретической радиотехники и математической статистики.

Краткое содержание основных разделов диссертации

В **первой главе** формулируются требования к разрабатываемой приемной системе для передвижных РСДБ-станций. Приведен обзор существующих зарубежных приемных систем, установленных на компактных радиотелескопах передвижных РСДБ-станций. Представлены их основные характеристики и рассмотрены особенности исполнения. Выделены основные системы (антенная

система, приемная система, системы регистрации и частотно-временной синхронизации), входящие в состав передвижной РСДБ-станции.

Рассмотрены основные характеристики приемных систем и их связь с параметрами радиоинтерферометра. Проанализированы основные способы снижения ошибки измерения задержки, как основного параметра радиоинтерферометра. Приведена оценка возможности использования малых антенн для РСДБ-наблюдений с радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО» по программам наблюдений IVS. Для определения совместимости параметров разработанной приемной системы с существующими кратко рассмотрены основные характеристики и устройство приемных систем радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО».

Представлены основные расчетные характеристики радиотелескопов для передвижной РСДБ-станции. В качестве прототипа РСДБ-радиотелескопа для передвижной станции выбрана антенная система наземной спутниковой станции TESLA диаметром 4.3 м. Сформулированы основные требования к разрабатываемой приемной системе.

В**о второй главе** приведены конструктивные решения, использованные при разработке и изготовлении приемной системы для передвижной РСДБ-станции. Разработанная приемная система состоит из нескольких основных блоков и предназначена для приема в диапазоне частот 8.2–9.1 ГГц, усиления, преобразования к промежуточной частоте (0.1–1 ГГц) сигналов радиоизлучения космических источников. Основной режим работы приемной системы — функционирование в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», кроме того доступен радиометрический режим работы.

Представлена функциональная схема приемной системы, рассмотрены принципы ее работы и функциональное назначение отдельных блоков. Рассматриваются конструктивные решения для облучателя, приемного тракта и отдельных блоков приемной системы. Представлены результаты экспериментального исследования основных характеристик блоков.

Проведен детальный анализ основных источников потерь в тракте, предложены способы минимизации шумовой температуры, позволяющие создать высокочувствительную приемную систему. В главе приведены расчеты вкладов основных узлов в шумовую температуру приемной системы. Представлены результаты исследования физических температур основных элементов блока приемного криостатируемого на криогенном режиме. Для охлаждения усилителей и разделителя поляризаций используется микрокриогенная система водородного уровня охлаждения, работающая по циклу Джиффорда-МакМагона, что в свою очередь является уникальным решением для компактных радиотелескопов.

Последний параграф главы посвящен моделированию размещения приемной системы на радиотелескопе РТ-4 — прототипе передвижной РСДБ-станции. При моделировании были учтены: особенности размещения облучателя и входного СВЧ-тракта, требования уменьшения длины СВЧ-соединений, размещение вспомогательной аппаратуры, систем регистрации и частотно-временной синхронизации и способы их взаимодействия с приемной системой, а также функции охлаждения аппаратуры приемной системы.

В **третьей главе** рассмотрены методики и результаты исследований созданной приемной системы. Приведены результаты измерения шумовой температуры приемной системы без облучателя и волноводного тракта, а также с волноводным трактом. Данные измерения позволили проверить корректность расчета вкладов различных узлов в шумовую температуру системы и правильность выбранных конструктивных решений. Кроме того, определены значения амплитудных калибровок, которые в дальнейшем позволят контролировать характеристики приемной системы на радиотелескопе.

В одном из параграфов данной главы исследуются нелинейные характеристики (искажения) блока приемного криостатируемого (БПК) и всей приемной системы. Приведены результаты оценки динамического диапазона и устойчивости приемной системы к воздействию помех. Определены точки компрессии и динамический диапазон, свободный от интермодуляционных искажений, для обоих каналов приемной системы. Методики измерений и

обработки, а также результаты измерений параметров нелинейности представлены в работе.

Рассмотрена работа приемной системы в комплексе с системой регистрации и системой частотно-временной синхронизации. Для комплексной проверки разработанной приемной системы был создан стенд «интерферометра на нулевой базе» включающий разработанную приемную систему, широкополосную приемную систему, трехдиапазонную радиоастрономическую приемную систему и приемную систему *X*-диапазона РТ-32, а также системы регистрации и частотно-временной синхронизации. Для сравнения параметров корреляционного отклика использованы все четыре приемные системы. Данный стенд позволил оценить возможность работы разработанной приемной системы в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», а также получить корреляционный отклик в лабораторных условиях. Представлены полученные результаты, методики измерения и расчет параметров корреляционного отклика, таких как отношение сигнал-шум (*SNR*) и среднеквадратическое отклонение (СКО) определения задержки.

Исследования разработанной приемной системы для передвижной РСДБ-станции показали, что вносимые созданной приемной системой и системой регистрации СКО задержки не превышают 5 пс. Результаты показали хорошее совпадение расчетных значений с экспериментальными, полученными на базах образованных приемными системами комплекса «Квазар-КВО» и созданной приемной системой.

В **четвертой главе** диссертации представлены результаты РСДБ-наблюдений радиотелескопа РТ-4 в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Рассматривается вклад шумов приемной системы в шумовую температуру системы компактной антенны прототипа передвижной РСДБ-станции. Проводится сравнение с зарубежными передвижными РСДБ-станциями.

Представлены результаты комплексного исследования аппаратуры прототипа передвижной станции. Оно заключалось в измерении шумовой температуры приемной системы вместе с облучателем на радиотелескопе РТ-4 и

исследовании параметров системы радиотелескоп-радиометр в радиометрическом режиме одиночного радиотелескопа. На основе детального анализа определены вклады основных составляющих в шумовую температуру системы для каждого канала.

По результатам измерений шумовая температура разработанной приемной системы $T_{пс}$ в канале правой поляризации (RCP) составила 37 К в канале левой поляризации (LCP) — 36 К. Значение *SEFD* для радиотелескопа РТ-4 составляет 16000–18000 Ян в зависимости от угла места и погодных условий. Приведены значения основных параметров существующих зарубежных передвижных станций, а также характеристики радиотелескопа РТ-4 прототипа передвижной РСДБ-станции, оснащенного созданной приемной системой.

В проведении РСДБ-наблюдений с участием радиотелескопа РТ-4 прототипа передвижной РСДБ-станции были задействованы радиотелескопы РТ-13 и РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». Опираясь на полученные значения *SEFD* для радиотелескопа РТ-4, были определены минимально различимые потоки излучения радиоисточников и спланированы наблюдения. На корреляторе RASFX в полосе частот 8592–9104 МГц были получены корреляционные отклики при наблюдениях источников радиотелескопом РТ-4 совместно с обсерваториями «Зеленчукская» и «Бадары».

Данные результаты позволяют говорить об успешном применении концепции «мобильных» РСДБ-станций и о возможности их применения в труднодоступных регионах совместно только с одной большой опорной станцией комплекса «Квазар-КВО». Первые краткосрочные наблюдения позволили получить трехмерные координаты передвижной станции с ошибкой порядка 10 сантиметров.

В **Заключении** обсуждаются основные результаты работы. Констатируется, что достигнутые параметры разработанной приемной системы близки к предельно достижимым для передвижной РСДБ-станции. В этой части диссертации приводятся основные результаты многолетней исследовательской работы и сформулированы основные выводы.

В конце диссертации приведены Список **сокращений** и Список используемой **литературы**.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Криоэлектронная приемная система для компактного радиотелескопа передвижной РСДБ-станции с элементами, охлаждаемыми до температуры жидкого водорода. Результаты исследования характеристик разработанной приемной системы. Конструктивные решения, позволившие осуществить криогенное охлаждение на компактном РСДБ-радиотелескопе.

2. Результаты исследования характеристик радиотелескопа РТ-4 прототипа передвижной РСДБ-станции, оснащенного разработанной высокочувствительной приемной системой.

3. Результаты РСДБ-наблюдений с участием прототипа передвижной РСДБ-станции в составе комплекса «Квазар-КВО».

Публикации по теме работы и личный вклад автора

По теме диссертации опубликованы 15 работ, из них 7 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК [А1–А7], 2 статьи, входящие в международную реферативную базу данных Scopus [А6, А7], 9 статей в рецензируемых журналах [А1–А7, А12, А15], 6 работ в материалах конференций [А8–А11, А13, А14].

В указанных работах по созданию, исследованию и применению в наблюдениях аппаратуры высокочувствительных криоэлектронных приемных систем автору принадлежат:

– в работах [А1, А2, А5, А6, А7, А9–А14] — непосредственное участие в разработке, исследовании и внедрении аппаратуры приемных устройств;

– в работах [А1, А5, А7, А15] — непосредственное участие в наблюдениях;

– в работе [А3] — непосредственное участие в разработке и опытной эксплуатации контрольно-измерительной системы;

– в работах [А4, А7] — непосредственное участие в создании аппаратно-программного комплекса для исследований, подготовке и проведении исследований;

– в работах [А8, А13, А14, А15] — разработка методик исследования, создание аппаратно-программного комплекса для исследований, обработка и анализ результатов.

Степень достоверности и апробация результатов

Основные положения и результаты работы обсуждались на научных семинарах ИПА РАН, на 6 всероссийских и 4 международных научных конференциях:

1. Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2014), Санкт-Петербург, 22-26 сентября 2014.

2. XIX Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 19 декабря 2014.

3. Шестая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015), Санкт-Петербург, 20-24 апреля 2015.

4. 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2015), Севастополь, 6–12 сентября 2015.

5. Двадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов, Санкт-Петербург, 11 декабря 2015.

6. 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2016), Севастополь, 4–10 сентября 2016.

7. 13th European VLBI Network Symposium and Users Meeting, St. Petersburg, September 20–23, 2016.

8. Седьмая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2017), Санкт-Петербург, 17-21 апреля 2017.

9. Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2018), Санкт-Петербург, 17-21 сентября 2018.

10. Восьмая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2019), Санкт-Петербург, 15-19 апреля 2019.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 146 страниц, 65 рисунков и 22 таблицы. Список литературы включает 88 наименований.

Глава 1. Передвижные РСДБ-станции

Существующие передвижные РСДБ-станции можно условно разделить на две категории — транспортабельные и мобильные. Мобильные станции чаще всего имеют специальное назначение, когда требуется быстрое или скрытное позиционирование. Они монтируются на автомобильных прицепах и могут быстро развертываться в рабочее состояние. Такие станции оборудуются, обычно, малыми антеннами диаметром 2–4 м.

Транспортабельные станции обладают большим диаметром зеркала и предназначены для более длительного использования в удаленных и труднодоступных местах (на островах, в горных районах). Они упаковываются, как правило, в морские контейнеры и доставляются на место железнодорожным или морским транспортом, а на заключительном этапе — автомобильными трейлерами и даже вертолетами. По прибытии на место антенна собирается и устанавливается на заранее подготовленное место на твердом грунте, а контейнеры переоборудуются под лабораторные и жилые помещения. Диаметр антенн таких станций бывает 2–9 м. Транспортабельные станции обычно работают на одном месте от нескольких недель до нескольких лет.

Характерной особенностью применения передвижных станций в труднодоступных регионах является использование только одной опорной станции, с большой антенной и включенной в систему ITRF [4].

1.1 Обзор существующих передвижных РСДБ-станций и их приемных систем

Анализ существующих решений стоит начать с антенн сети ORION (Оперативная Радио Интерферометрическая Наблюдательная Сеть), которая создавалась NASA с конца 70-х начала 80-х гг. для решения геофизических задач проекта «Динамика земной коры» [5,6]. Сеть ORION включает три передвижные РСДБ-станции и позволяет достичь сантиметрового уровня точности определения координат при длине базы порядка 5000 км. Данная точность определения координат достигается при выполнении ряда условий: совместная работа антенны

передвижной станции с радиотелескопом диаметром как минимум 9 м, коэффициент использования поверхности (*КИП*) не хуже 0.5 в *X*-диапазоне частот и шумовая температура системы порядка 40 К [7]. Стоит также отметить, что для учета вклада ионосферы принимались сигналы в *S* и *X* диапазонах частот при этом требования к шумовой температуре системы в *S*-диапазоне менее жесткие.

Таким образом, приемная система *S/X* диапазона частот для сети ORION включала в себя: приемник с преобразованием СВЧ-сигнала в сигнал промежуточной частоты (ПЧ), систему регистрации, систему частотно-временной синхронизации и фазовой калибровки. Рабочая полоса частот в *S*-диапазоне 2220–2320 МГц, в *X*-диапазоне 8200–8600 МГц, *КИП* — 0.4–0.5. Осуществлялся прием СВЧ-сигнала правой и левой круговых поляризаций (RCP и LCP). Полоса ПЧ 250–350 МГц и 100–500 МГц соответственно для *S* и *X* диапазона частот [8]. Все частотные преобразования сигнала осуществляются когерентно, используется сигнал опорной частоты, формируемый системой частотно-временной синхронизации. Приемная часть системы с облучателями *S/X* диапазона и малошумящими усилителями (МШУ) располагалась непосредственно на антенне, а часть аппаратуры, отвечающая за частотное преобразование — в транспортном контейнере и соединялась с приемной частью посредством коаксиальных кабелей. Такой приемной системой была оснащена первая мобильная станция MV-1 с антенной диаметром 9 м.

К 1983 году были созданы еще две мобильные РСДБ-станции MV-2 и MV-3 с диаметрами антенн 3.6 и 5 м соответственно. Станция MV-3 относилась к проекту «Advanced ARIES» (усовершенствованный проект ARIES) и оснащалась модернизированной приемной системой с рабочей полосой частот 2.21–2.45 ГГц в *S*-диапазоне и 8.18–8.92 ГГц в *X*-диапазоне с шумовой температурой приемника 19 К и 24 К для *S*- и *X*- диапазонов соответственно. При этом облучатель *S*-диапазона располагался в первичном фокусе, а облучатель *X*-диапазона во вторичном фокусе системы Кассегрена. Вместе все три станции были объединены в проект ORION. С 1991 года станция MV-3 (Рисунок 1.1) располагается на базе GGAO (Goddard Geophysical and Astronomical Observatory) [9].

Рисунок 1.1. Антенна MV-3 (диаметром 5 м) в GGAO — настоящее время.

Далее рассмотрим передвижную геодезическую станцию TIGO (Transportable Integrated Geodetic Observatory), построенную федеральным агентством картографии и геодезии (BKG) в Германии. В ноябре 1997 года были проведены первые тестовые РСДБ-наблюдения на базе обсерватории Ветцель (Германия). С 2001 года станция TIGO располагалась в чилийском городе Консепсион [10]. С 2016 года станция перевезена в Аргентину, новый проект получил название — AGGO (Argentinean-German Geodetic Observatory). Основным инструментом РСДБ-станции TIGO является радиотелескоп диаметром 6 м и весом 23 тонны (Рисунок 1.2).

Технические параметры радиотелескопа и приемной системы приведены в таблице 1.1 [11,12]. Облучатель и входные усилительные каскады приемной системы размещаются непосредственно в первичном фокусе, предусмотрено криогенное охлаждение входных усилительных каскадов. Стоит отметить, что радиотелескоп TIGO выполнен в виде офсетной антенны.

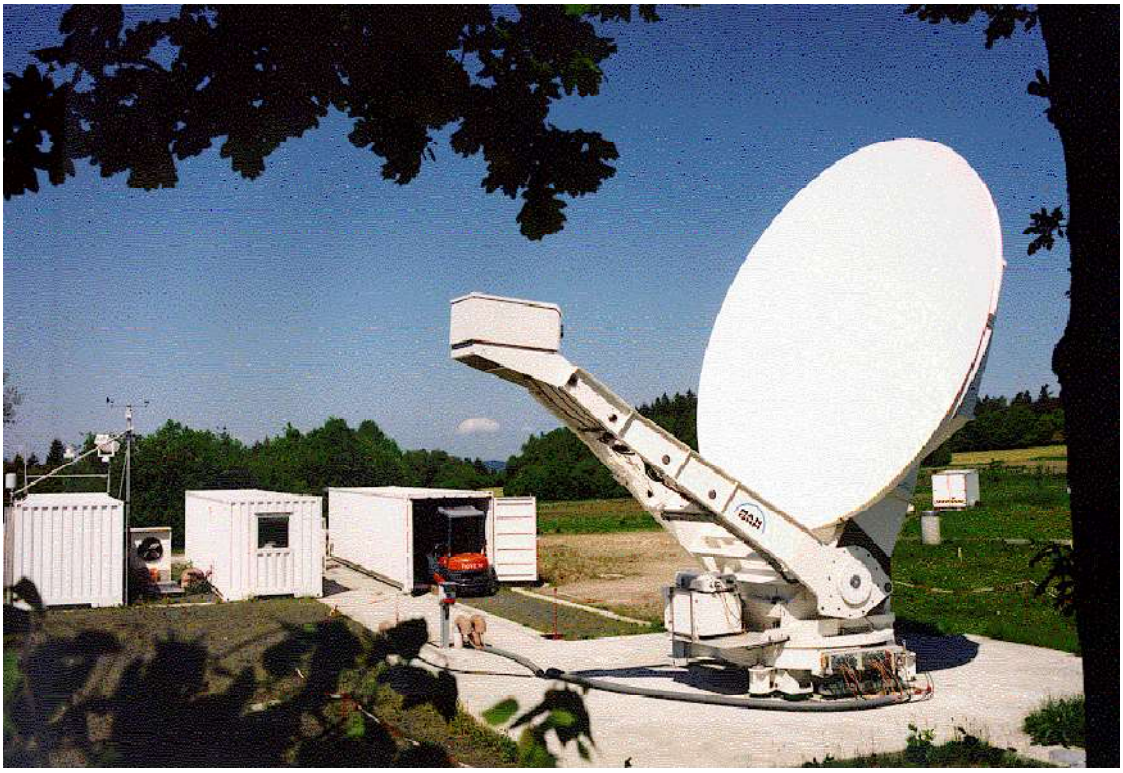


Рисунок 1.2. 6-м антенна РСДБ-станции TIGO, готовая к работе.

Таблица 1.1. Параметры радиотелескопа TIGO

Параметр	Значение
Тип радиотелескопа	Офсетная антенна
Диаметр основного зеркала, D	6 м
Фокусное расстояние, f	2.18 м
f/D	0.3629
Точность поверхности зеркала	±0.2 мм
S-диапазон	
Входной диапазон частот приемной системы, Δf	2.2–2.4 ГГц
Шумовая температура, $T_{\text{сис}}$	85 K
SEFD	12000 Ян
КИП	0.7
X-диапазон	
Входной диапазон частот приемной системы, Δf	8.1–8.9 ГГц
Шумовая температура, $T_{\text{сис}}$	65 K
SEFD	7700 Ян
КИП	0.8

Обычно, РСДБ-наблюдения TIGO проходят в рамках Международной РСДБ службы (IVS). Основная программа включает непрерывный мониторинг парамет-

ров вращения Земли, в котором станция ведет наблюдения в составе различных глобальных РСДБ-сетей от одного до трех раз в неделю в течение 24 часов. Каждый 24-часовой эксперимент включает наблюдения около 300 источников, а наблюдение каждого занимает около 3–5 минут [12,13].

Стоит отметить проект CARAVAN (впоследствии MARBLE), разработанный в NICT (National Institute of Information and Communication Technology) Япония. Работы над проектом CARAVAN (Compact Antenna of Radio Astronomy VLBI Adapted for Network) начались в начале 2000-х годов с целью увеличения покрытия РСДБ-станций (в районе Тихого океана и южного полушария). В 2004–2005 для проекта CARAVAN была разработана 2.4 м антенна. Данная антенна была оснащена «теплыми» МШУ *X*-диапазона и получила название CARAVAN2400 (Рисунок 1.3) [14]. Входная полоса частот антенны CARAVAN2400 — 8180–8600 МГц, шумовая температура приемника и системы составляет 116 К и 127 К соответственно, *КИП*=0.42. В 2006 году совместно с Kashima 34m получен отклик радиоисточника 3C84 [15].

Рисунок 1.3. Антенна CARVAN 2400 в Кашиме (Япония). Kashima 34m на заднем плане.

В 2006 году NICT начал разработку компактной станции MARBLE (Multiple Antenna Radio-interferometer for Base Length Evaluation). Разработка началась с системы 1.6 м зеркальных антенн. Компактная РСДБ-система MARBLE должна

принимать сигналы в *S* и *X* диапазонах частот и работать с 34 м антенной Kashima 34m. Стоит отметить, что макетом для антенн MARBLE1 служила антенна CARAVAN2400, при ее модернизации в 2007 году был удален контрефлектор и на его место установлена приемная система *S/X* диапазонов частот с неохлаждаемыми усилителями, ее схема показана на рисунке 1.4. Как видно из схемы, прием сигнала осуществляет спиральная антенна (круговая поляризация), далее в диплексере происходит частотное разделение на *S*- и *X*- каналы, усиление неохлаждаемыми усилителями в каждом канале и выделение нужных полос, далее — преобразование в полосу ПЧ и окончательное усиление. При этом предусмотрена фазовая калибровка приемного тракта. Полоса ПЧ приемной системы: 625–785 МГц и 500–1400 МГц для *S* и *X* диапазонов соответственно. Шумовая температура усилителей — порядка 80 К, учитывая потери в тракте шумовая температура приемной системы составила 124 К и 131 К для *S*- и *X*-диапазонов соответственно [16].

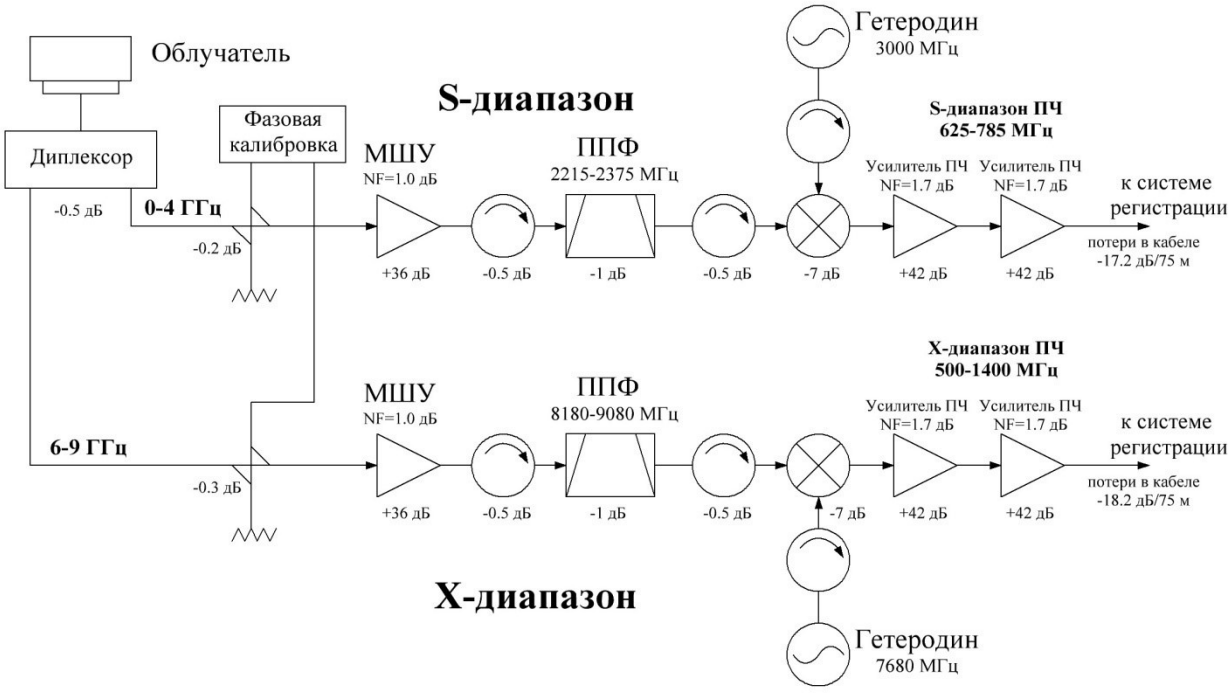


Рисунок 1.4. Схема S/X приемной системы 2.4 м антенны CARAVAN2400.

В 2007 году началась разработка широкополосной приемной системы с четырех-гребневым рупором QRHA (Quad-Ridge Horn Antenna) облучателем 2–18 ГГц (линейная поляризация) в первичном фокусе. В конце 2007 облучатель

был установлен на антенну CARAVAN2400, при этом усилительные и преобразовательные каскады не изменились. Был получен отклик в *S*- и *X*-диапазонах при совместных наблюдениях с Kashima 34m. В 2008 были проведены успешные геодезические РСДБ эксперименты с GSI 32m (GSI — Geospatial Position System). Формальная ошибка для результатов с новым облучателем составила 6 мм.

К концу 2008 года был разработан прототип 1.65 м антенны (*f*/*D*=0.45) MARBLE2, оснащавшийся широкополосной приемной системой с четырехгребневым рупором QRHA 2–18 ГГц (линейная поляризация) в первичном фокусе. На рисунке 1.5 представлена схема широкополосной приемной системы MARBLE.

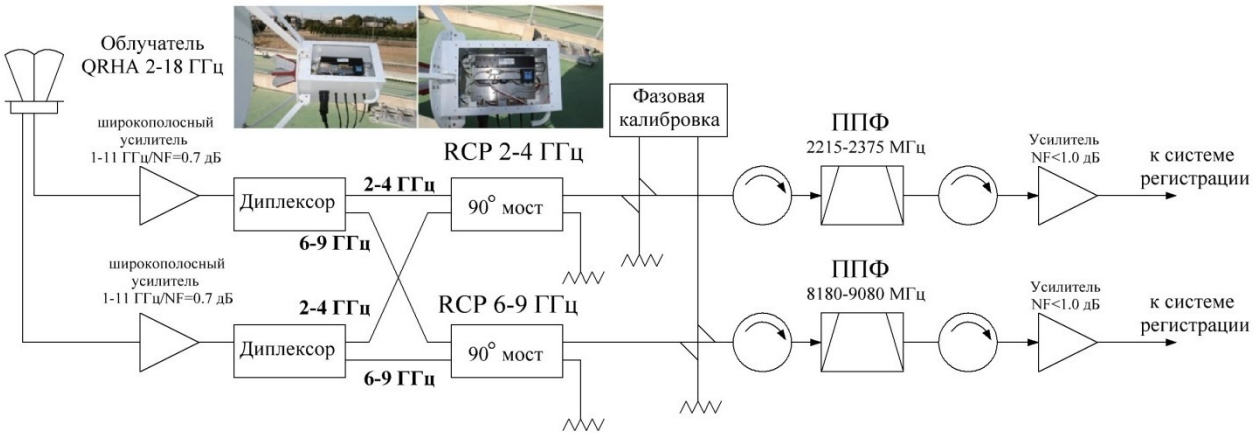


Рисунок 1.5. Схема приемной системы 1.65 м антенны.

QRHA принимает сигналы в двух линейных поляризациях в диапазоне 2–18 ГГц, далее сигналы усиливаются широкополосными неохлаждаемыми МШУ, работающими в диапазоне частот 1–11 ГГц. Диплексер осуществляет частотное разделение сигнала таким образом, что два канала 2–4 ГГц и два канала 6–9 ГГц приходят на соответствующие 90-градусные гибридные мосты, где из двух линейных поляризаций образуются круговые. Далее сигнал правой круговой поляризации поступает на полосовой фильтр и усилитель, после чего поступает на преобразовательный модуль, а сигнал левой круговой поляризации уходит в согласованную нагрузку. Первый МШУ имеет шумовую температуру порядка 50 К. С учетом возможных потерь до МШУ можно предположить что шумовая температура такой приемной системы будет порядка 65–70 К [2, 3].

В 2016 году зеркальная система антенны MARBLE2, установленной в Koganei в головном офисе NICT, была модернизирована и выполнена по схеме Кассегрена с диаметром основного зеркала 2.4 м. Во вторичном фокусе был установлен облучатель NINJA, при использовании теплых МШУ шумовая температура системы в диапазоне частот 3–11 ГГц составила 150–200 К. На данный момент шумовая температура системы MARBLE1 порядка 200–300 К. Обе антенны MARBLE принимают сигнал одной линейной поляризации, *SEFD* для MARBLE1 составляет $1 \div 2 \cdot 10^6$ Ян, для MARBLE2 соответственно — $2 \div 4 \cdot 10^5$ Ян [17]. По результатам расчета определен коэффициент использования поверхности (*КИП*): для MARBLE1 *КИП*=0.1–0.15, а для MARBLE2 *КИП*=0.2–0.25 в диапазоне 3–11 ГГц (По данным NICT после модернизации MARBLE2 *КИП* должен быть равен 0.3–0.4) [18].

В Таблице 1.2 приведены характеристики антенн и приемных систем существующих передвижных станций. Стоит отметить, что основным рабочим диапазоном частот у этих станций является *X*-диапазон. Наиболее совершенная станция TIGO с радиотелескопом диаметром 6 м обладает значением *SEFD*=7700 Ян.

Таблица 1.2. Характеристики антенн передвижных РСДБ-станций.

Антенна	D_a,м	Поляризация	*SEFD,* Ян	*КИП*	$T_{сис}$, К	$T_{пр}$, К	Δf, ГГц
ORION MV-3	5	2 круговые	–	–	–	19	2.21–2.45
		2 круговые	40000	0.4–0.5	130	24	8.2–8.9
TIGO	6	–	12000	0.7	85	65	2.2–2.4
		–	7700	0.8	65	45	8.1–8.9
CARAVAN2400	2.4	1 круговая	–	–	125	75	2.2–2.4
		1 круговая	$2 \cdot 10^5$	0.4	130	80	8.2–8.6
MARBLE1	1.6	1 линейная	$1–2 \cdot 10^6$	0.10–0.15	200–300	65–70	3–11
MARBLE2	2.4	1 линейная	$2–4 \cdot 10^5$	0.3–0.4	150–200	65–70	3–11

По результатам проведенного обзора существующих передвижных РСДБ-станций можно сформулировать следующие основные принципы построения передвижных РСДБ-станций и разрабатываемой приемной системы:

1. Передвижная РСДБ-станция должна включать поворотную антенную систему с электроприводом и системой наведения, радиоастрономическую приемную систему с возможностью преобразования СВЧ-сигналов к промежуточным частотам, включающую облучатель, систему частотно-временной синхронизации, обеспечивающую когерентность частотных преобразований сигнала и систему регистрации.

2. Ключевым элементом, определяющим характеристики, передвижной РСДБ-станции является приемная система. От нее зависит выбор антенной системы. Поскольку предполагается работа передвижной станции в составе РСДБ-сети, крайне важна связь параметров приемной системы с характеристиками интерферометра.

3. Выбор антенной системы следует акцентировать на двухзеркальной конструкции антенной системы с диаметром основного зеркала 2–4 м либо однозеркальной с меньшим диаметром. Для обеспечения максимальной чувствительности передвижной РСДБ-станции использование двухзеркальной антенной системы предпочтительнее.

4. При выборе поляризации и принимаемых диапазонов частот целесообразно ориентироваться на совместную работу в составе РСДБ-сети «Квазар-КВО». Габаритные размеры облучателя его тип и характеристики непосредственно связаны с размерами, конструкцией и типом антенной системы.

5. Стоит отметить, что основные сложности разработки приемной системы для компактной антенны заключаются в габаритах антенной системы передвижной станции, формирующих отдельные требования к приемному устройству. В первую очередь — это малые допустимые объем и масса фокального контейнера, что необходимо учитывать при разработке приемной системы. Так же необходимо учитывать размещение системы частотно-временной синхронизации и систе-

мы регистрации с учетом передачи принимаемого сигнала от приемной к регистрирующей системе.

6. Для формирования требований к характеристикам приемной системы для передвижной РСДБ-станции в первую очередь необходимо сделать выбор антенной системы (ее тип и размеры). Для этого необходимо провести оценку возможности проведения РСДБ-наблюдений передвижной станции в составе комплекса «Квазар-КВО» для источников с типичными потоками радиоизлучения.

1.2 Характеристики приемной системы радиотелескопа и их связь с параметрами радиоинтерферометра

Блок схема классического радиоинтерферометра со сверхдлинной базой показана на рисунке 1.6 [20]. Приемная система радиотелескопа осуществляет прием шумового радиоизлучения от космического источника в заданной полосе частот, в некотором телесном угле и преобразует его в сигнал промежуточной частоты (ПЧ), подаваемый на систему регистрации [21]. Телесный угол определяется конструкцией антенной системы радиотелескопа, системой облучения и длиной волны. Полоса частот определяется приемной системой, облучающей системой и системой регистрации. Радиотелескоп преобразует электромагнитные волны, распространяющиеся в свободном пространстве, в волну, распространяющеюся в линии передачи, при этом радиотелескоп представляет собой собирающую апертуру в фокусе, которой располагается облучатель приемной системы. Когерентность частотных преобразований принимаемого сигнала обеспечивает система частотно-временной синхронизации (СЧВС).

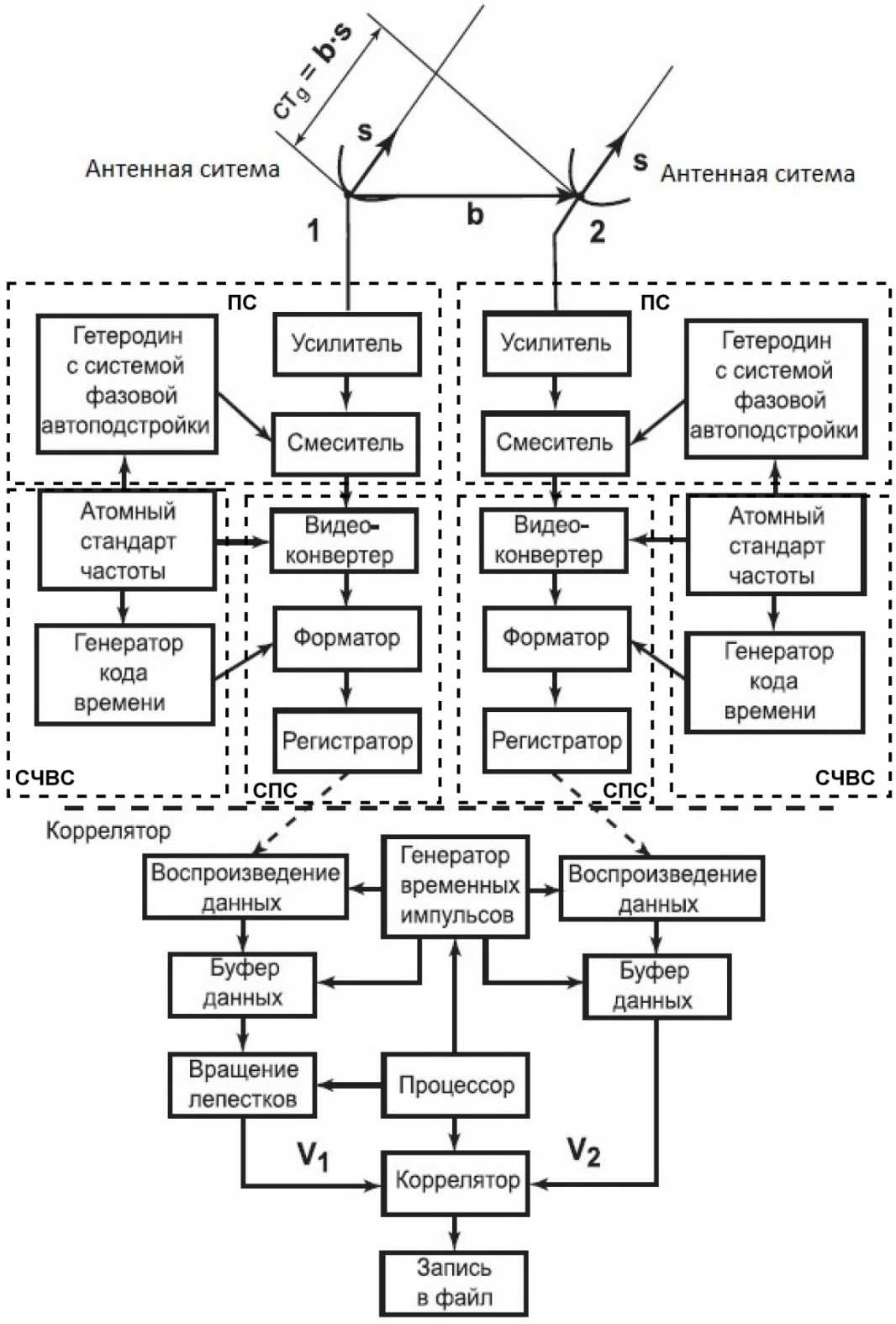


Рисунок 1.6. Схема радиоинтерферометра со сверхдлинной базой сети «Квазар-КВО». ПС — приемная система, СПС — система преобразования сигналов, СЧВС — система частотно-временной синхронизации.

Основными параметрами, характеризующими приемную систему радиотелескопа (включающую облучатель) являются: шумовая температура системы ($T_{\text{сис}}$) и коэффициент использования поверхности (*КИП*). Для оценки чувствительности радиотелескопа по естественным источникам удобно использовать обобщающую величину, позволяющую оценить возможность проведения наблюдений на определенном радиотелескопе. Такой величиной в радиоастрономии является эквивалентная плотность потока системы (*SEFD* — System Equivalent Flux Density) представляющая собой плотность потока гипотетического радиоисточника, принимаемая от которого мощность равна мощности генерируемой самой приемной системой [22]. Антенная температура такого гипотетического источника равна шумовой температуре приемной системы.

Исходя из определения:

$$SEFD = 2k\frac{T_{\text{сис}}}{A_{\text{эфф}}}, \tag{1.1}$$

где k — постоянная Больцмана;

$A_{\text{эфф}}$ — эффективная площадь радиотелескопа;

$A_{\text{эфф}}=КИП\cdot A_{\text{геом}}$, $A_{\text{геом}}$ — площадь апертуры антенны;

$T_{\text{сис}}$ — шумовая температура системы радиотелескоп–радиометр.

Значение *SEFD* может быть определено, путем измерения выходного сигнала приемного устройства в двух положениях антенны: наведенной на источник и отведенной от него по азимуту.

В шумовою температуру системы $T_{\text{сис}}$ вносят вклад:

– $T_{\text{а}}$ — шумовая температура антенны, определяющаяся главным образом излучением окружающей среды (атмосфера, космическое излучение, излучение земли), которое попадает на вход приемного устройства через главный и боковые лепестки диаграммы направленности антенны.

– $T_{\text{тр}}$ — тепловое излучение потерь ($L_{\text{тр}}$), находящихся при физической температуре ($T_{\text{ф}}$) в тракте между облучателем и входом приемного устройства.

– $T_{\text{пр}}$ — эквивалентная шумовая температура приемного устройства, пересчитанная ко входу.

– $T_{\text{каб}}$ — тепловое излучение потерь ($L_{\text{каб}}$) соединительных кабелей между приемным устройством и системой регистрации сигналов, находящихся при физической температуре ($T_{\text{ф}}$).

– $T_{\text{рег}}$ — эквивалентная шумовая температура входа системы регистрации сигналов.

Пересчитаем шумовую температуру системы $T_{\text{сис}}$ ко входу облучателя используя формулу Фрииса:

$$T_{\text{сис}} = T_{\text{а}} + T_{\text{ф}}(L_{\text{тр}} - 1) + L_{\text{тр}}T_{\text{пр}} + T_{\text{ф}}\frac{(L_{\text{каб}} - 1)L_{\text{тр}}}{G_{\text{пр}}} + \frac{L_{\text{тр}}L_{\text{каб}}T_{\text{рег}}}{G_{\text{пр}}}, \quad (1.2)$$

где $G_{\text{пр}}$ — коэффициент усиления приемного устройства.

Теперь рассмотрим параметры радиоинтерферометра и их связь с характеристиками приемной системы. В большинстве астрометрических экспериментов осуществляется анализ групповой задержки $\tau_{\text{з}}$ и частоты интерференции $f_{\text{и}}$, т.е. скорости изменения фазовой задержки. Соответственно, основным параметром радиоинтерферометра, как инструмента определяющего задержку между двумя сигналами является точность измерения задержки. Оценка точности измерения $\tau_{\text{з}}$ (среднеквадратической ошибки) согласно [23] определяется по формуле:

$$\sigma_{\tau_{\text{з}}} = \frac{1}{\sqrt{8\pi^2}}\left(\frac{T_{\text{сис}}}{T_{\text{ист}}}\right)\frac{1}{\sqrt{\Delta f t}\Delta f_{\text{скз}}}, \quad (1.3)$$

где t — время накопления;

$T_{\text{сис}}$ — шумовая температура системы, введенная ранее;

$T_{\text{ист}}$ — антенная температура источника (приращение антенной температуры при наведении на компактный источник);

Δf — ширина полосы регистрации;

$\Delta f_{\text{скз}}$ — среднеквадратичная ширина полосы (определяется синтезом широкой полосы). Для простейшей прямоугольной радиочастотной полосы $\Delta f_{\text{скз}}$ может быть выражена формулой:

$$\Delta f_{\text{скз}} = \frac{\Delta f}{\sqrt{12}}. \tag{1.4}$$

Далее представим радиоинтерферометрические наблюдения в наиболее простом виде. Рассмотрим два радиотелескопа с шумовыми температурами системы $T_{\text{сис1}}$ и $T_{\text{сис2}}$, которые при наведении на радиоисточник с плотностью потока F дают приращения антенных температур $T_{\text{ист1}}$ и $T_{\text{ист2}}$. Представим выражение описывающее отношение сигнал-шум на выходе коррелятора в следующем виде:

$$SNR = \eta \sqrt{\frac{T_{\text{ист1}}\, T_{\text{ист2}}}{T_{\text{сис1}} T_{\text{сис2}}} (2\Delta f t)}, \tag{1.5}$$

где η — коэффициент, учитывающий потери при квантовании сигналов и их обработке, для 2-битового квантования $\eta = 0.88$. Плотность потока источника может быть выражена по аналогии с формулой (1.1) через приращение антенной температуры $T_{\text{ист}}$ и будет иметь следующий вид:

$$F = 2k \frac{T_{\text{ист}}}{A_{\text{эфф}}}. \tag{1.6}$$

Используя выражения (1.1, 1.3–1.6) получим:

$$\sigma_{\tau_з} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{\sqrt{SEFD_1 \cdot SEFD_2}}{\pi \cdot \Delta f^{\frac{3}{2}} \cdot \eta \cdot F \cdot \sqrt{t}}. \tag{1.7}$$

На основе выражении (1.7) видно, что ошибка измерения задержки может быть уменьшена за счет:

– Снижения величины *SEFD* — путем уменьшения шумовой температуры системы, увеличения апертуры радиотелескопа и увеличения *КИП*;

– Расширения рабочей полосы частот Δf. На расширение Δf накладывают ограничения ширина полосы системы регистрации и помеховая обстановка в районе действия радиотелескопов. Расширение полосы рабочих частот ведет к существенному усложнению конструкции приемной системы, а также накладывает отдельные требования на точность поверхности радиотелескопа;

– Увеличения F — наблюдением более мощных источников (не всегда возможно);

– Увеличения времени наблюдения t — ограничивается временем когерентности.

1.3 Характеристики приемных систем комплекса «Квазар-КВО»

Одним из основных требований к разрабатываемой приемной системе является необходимость ее работы в радиоинтерферометрическом режиме совместно со станциями РСДБ-сети «Квазар-КВО». Соответственно приемная система (ПС) должна быть совместима по основным параметрам с параметрами ПС других радиотелескопов, работающих в РСДБ-сети.

Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» — специализированный комплекс для решения задач фундаментально-координатного обеспечения страны в интересах фундаментальной и прикладной науки: астрономии, геодинамики, астрофизики, космологии, геодезии, космической навигации и метрологии. Комплекс представляет собой систему, состоящую из трех радиообсерваторий: «Светлое» (Ленинградская область), «Зеленчукская» (Карачаево-Черкесская Республика), «Бадары» (Республика Бурятия), а также центра управления и обработки данных, расположенного в Санкт-Петербурге [24]. Основными инструментами обсерваторий являются радиотелескопы РТ-13 и РТ-32.

Каждый радиотелескоп РТ-32 оснащен высокочувствительным приемным СВЧ-комплексом для приема сигналов в следующих диапазонах: *K* (22.02–22.52 ГГц), *X* (8.18–9.08 ГГц), *C* (4.60–5.50 ГГц), *S* (2.15–2.50 ГГц) и *L* (1.38–1.72 ГГц). Входные приемные каскады охлаждаются до водородного уровня температур и позволяют принимать радиоизлучение от радиоисточников в двух круговых поляризациях (RCP и LCP) с предельной чувствительностью [25].

Совмещенная *S/X* приемная система (Рисунок 1.7) построена по схеме с шумовым пилот-сигналом, сочетающая в себе возможности модуляционного

приема для режима одиночного телескопа (радиометрический режим) и корреляционной обработки сигналов в режиме РСДБ-сети. В этой приемной системе осуществляется одновременный прием сигналов *S* и *X* диапазонов частот с помощью совмещенного облучателя в виде синфазного биконического рупора. С выхода облучателя сигнал поступает на двухканальный *S*-криоблок и одноканальные *X*-криоблоки, где происходит усиление слабых СВЧ-сигналов с помощью охлаждаемых малошумящих усилителей (МШУ). С помощью встроенного в криоблок направленного ответвителя (НО) на вход МШУ подается сигнал амплитудной калибровки от блока генераторов шума (БГШ) и фазовой калибровки от генератора пикосекундных импульсов (ГПИ). Усиленный сигнал с выхода криоблоков поступает по коаксиальным кабелям на вход блока преобразования частот (БПЧ) [26]. Принцип работы отдельных блоков и их характеристики подробно описаны в работах [27–29]. Основные параметры S/X приемной системы приведены в таблице 1.3.

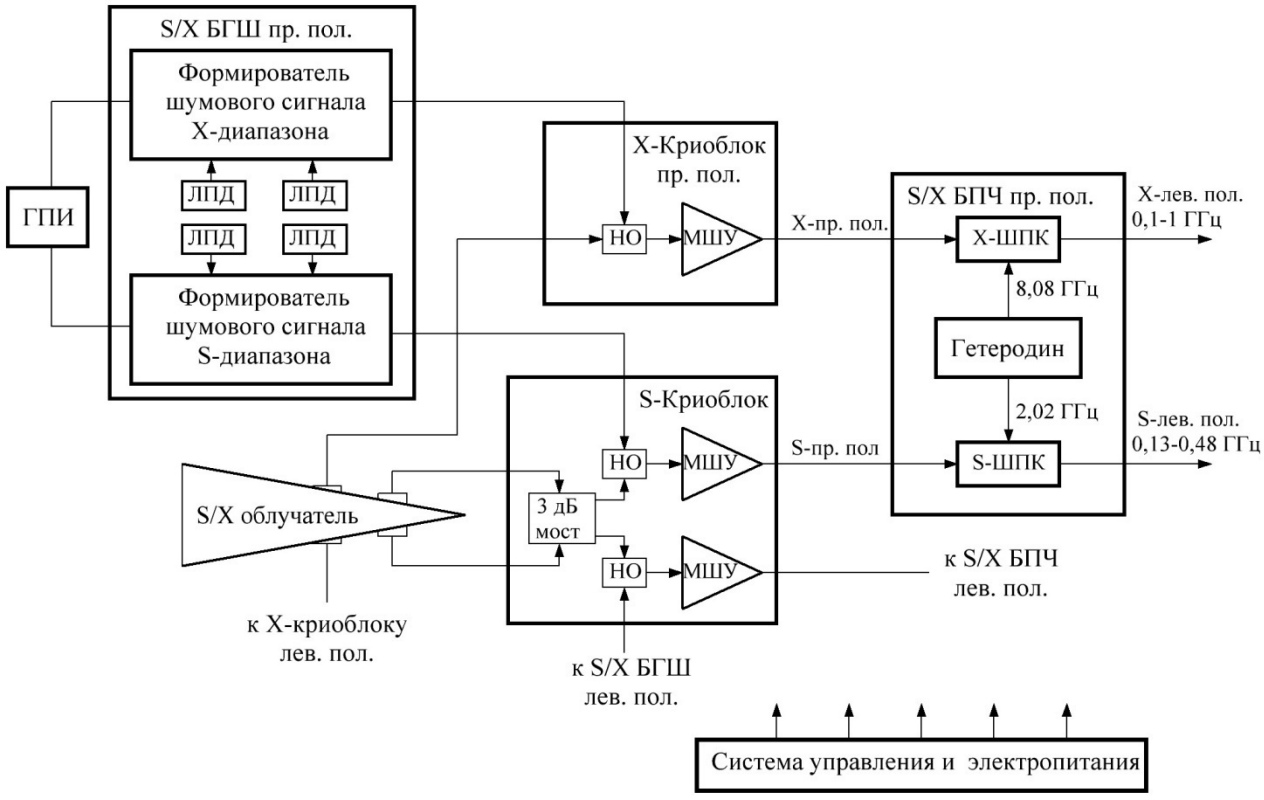


Рисунок 1.7. Функциональная схема приемной системы *S/X* диапазонов длин волн радиотелескопа РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Таблица 1.3. Основные параметры *S/X* ПС РТ-32.

Параметр	*S*-диапазон	*X*-диапазон
Δf (ВЧ), ГГц	2.15–2.50	8.18–9.08
Δf (ПЧ), ГГц	0.13–0.48	0.10–1.00
$T_{\text{пр}}$, К	10	12
$G_{\text{пр}}$, дБ	65	65
$G_{\text{криоблок}}$, дБ	30	30
$G_{\text{БПЧ}}$, дБ	35	35

Ширина полосы принимаемых частот в *X*-диапазоне составляет 900 МГц. За счет криогенного охлаждения входных усилительных каскадов шумовая температура приемника не превышает 12 К, при этом шумовая температура системы $T_{\text{сис}}$ для РТ-32 в данном диапазоне составляет 40–45 К, что объясняется потерями в фидерном тракте.

Радиотелескопы РТ-13, предназначенные для оперативного определения поправок всемирного времени UT1, оснащаются двумя типами приемных систем трехдиапазонной и широкополосной [30, 31]. Главной особенностью трехдиапазонной приемной системы является возможность одновременного приема шумовых радиосигналов в трех диапазонах частот: *S* (2.2–2.6 ГГц), *X* (7.0–9.5 ГГц) и *Ka* (28–34 ГГц) в обеих круговых поляризациях с помощью охлаждаемого до криогенных температур совмещенного облучателя [32].

Приемная система реализована в виде нескольких блоков (Рисунок 1.8), которые размещены на единой раме в фокальном контейнере, расположенном во вторичном фокусе антенны РТ-13 [33]. В криогенном приемном фокальном блоке (КПФБ) размещаются облучатель, направленные ответвители и 6 малошумящих усилителей, охлаждаемых до температур менее 20 К [34]. Разделенные по поляризациям сигналы после КПФБ в соответствии с диапазонами поступают на один из трех блоков преобразования частоты (БПЧ). БПЧ-*X* и БПЧ-*Ka* диапазонов имеют на выходе по три частотных поддиапазона в каждой из поляризаций. Блок коммутации осуществляет дополнительное усиление и коммутацию сигналов для

их передачи на систему преобразования сигналов (СПС). Синхронизация частотных преобразований сигнала в приемных каналах осуществляется от системы частотно-временной синхронизации радиотелескопа. Основные параметры трехдиапазонной приемной системы приведены в таблице 1.4.

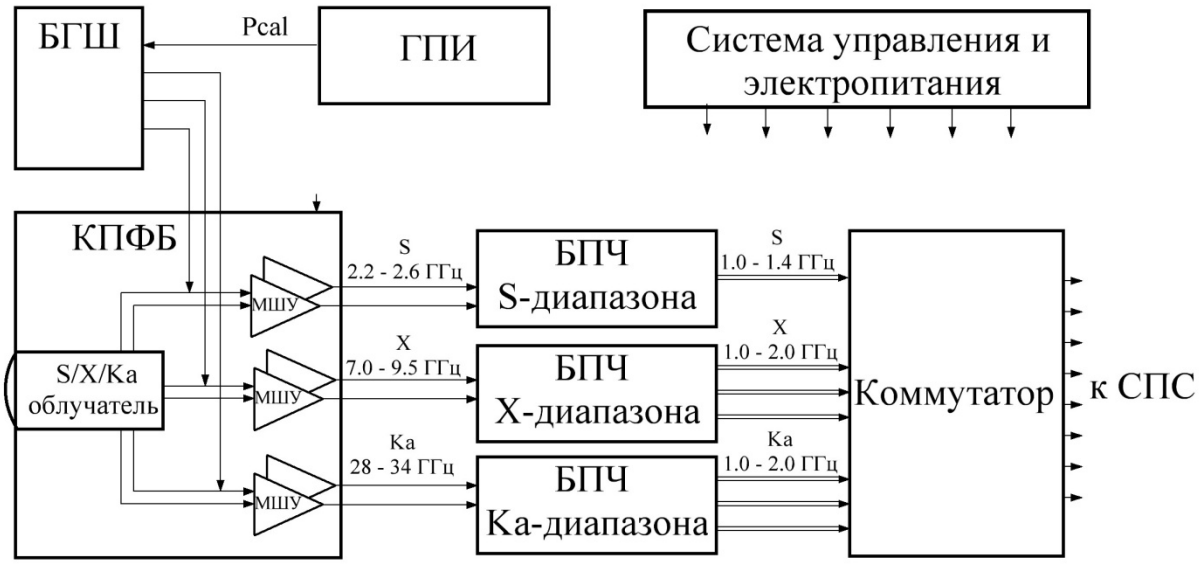


Рисунок 1.8. Функциональная схема трехдиапазонной приемной системы радиотелескопа РТ-13 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Таблица 1.4. Основные параметры трехдиапазонной приемной системы РТ-13.

Параметр	*S*-диапазон	*X*-диапазон	*Ka*-диапазон
Δf (ВЧ), ГГц	2.2–2.6	7.0–9.5	28–34
Δf (ПЧ), ГГц	1.0–1.4	1.0–2.0	1.0–2.0
$T_{пр}$, К	20	17	48
$G_{пр}$, дБ	100	98	94
$G_{КПФБ}$, дБ	30	30	29
$G_{БПЧ}$, дБ	48	46	42
$G_{БК}$, дБ	23	23	23

За счет охлаждения облучателя и входных усилительных каскадов шумовая температура системы РТ-13 с трехдиапазонной приемной системой в *X*-диапазоне частот составляет 35 К. Ширина полосы ПЧ — 1 ГГц.

Для обеспечения возможности работы радиотелескопов РТ-13 в VLBI Global Observing System (VGOS) в ИПА РАН разработана широкополосная приемная система (ШПС) с рабочим диапазоном частот 3–16 ГГц на

ортогональных линейных поляризациях [35] (Рисунок 1.9).

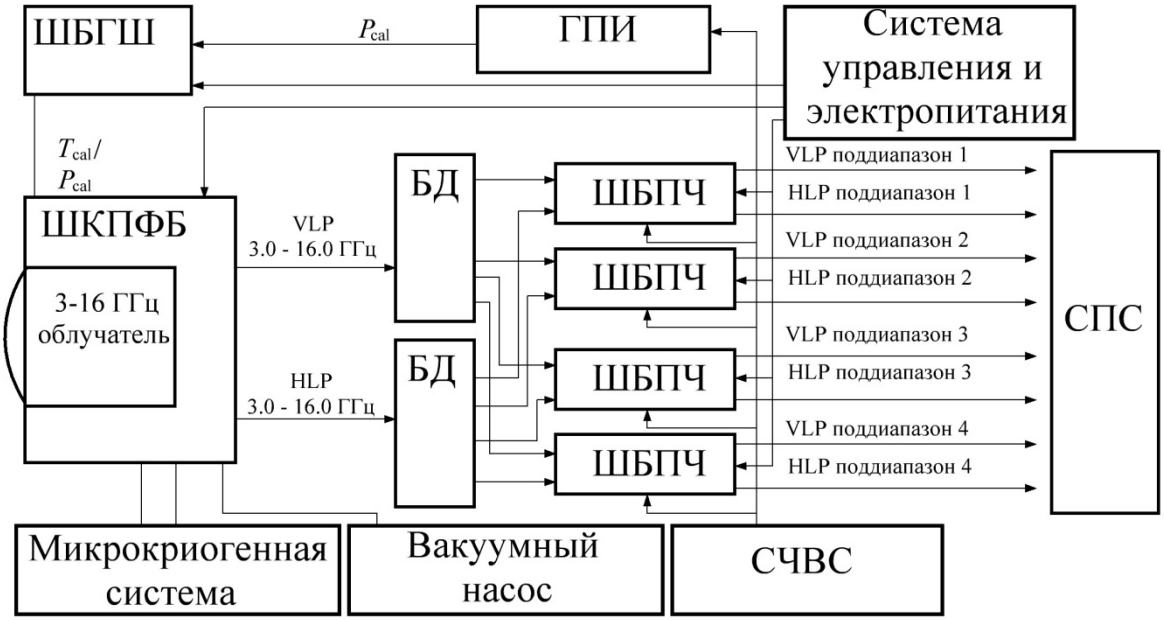


Рисунок 1.9. Функциональная схема широкополосной приемной системы радиотелескопа РТ-13 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

Прием сигналов вертикальной и горизонтальной поляризации от космического радиоисточника осуществляется широкополосным облучателем [36], находящимся за радиопрозрачным окном широкополосного криогенного приемного фокального блока (ШКПФБ). В ШКПФБ сигналы после облучателя складываются с сигналами фазовой и амплитудной калибровки от широкополосного блока генератора шума (ШБГШ) и усиливаются с помощью охлаждаемых малошумящих усилителей (МШУ) [37]. С выхода ШКПФБ сигналы поступают на блоки делителей (БД) по одному для каждой поляризации, где дополнительно усиливаются и разделяются на четыре равных сигнала. Затем они поступают на входы четырех широкополосных блоков преобразователей частоты (ШБПЧ) [А2]. В них осуществляется усиление, фильтрация и двойное преобразование частоты. Выбранный участок полосы частот шириной 2 ГГц (поддиапазон) из диапазона 3–16 ГГц преобразуется в полосу ПЧ 0–2 ГГц. Когерентность преобразования сигнала в приемных каналах обеспечивается системой высокоточной синхронизации РСДБ-радиотелескопа. На выходе ШПС имеется 8 каналов: по 4 частотных канала горизонтальной и вертикальной

линейных поляризаций. Основные параметры широкополосной приемной системы РТ-13 приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5. Основные параметры широкополосной приемной системы РТ-13 (на частоте 7.5 ГГц).

Параметр	Значение
Δf (СВЧ), ГГц	3–16
Δf (ПЧ), ГГц	0.05–2.05
$T_{\text{пр}}$, К	25
$G_{\text{пр}}$, дБ	93
$G_{\text{ШКПФБ}}$, дБ	40
$G_{\text{БД}}$, дБ	23
$G_{\text{БПЧ}}$, дБ	30

Широкополосная приемная система осуществляет прием сигналов в двух ортогональных линейных поляризациях в диапазоне частот 3–16 ГГц. Особенность ШПС проводить наблюдения источников в поддиапазонах шириной 2 ГГц в пределах входной полосы является удобным инструментом для оценки характеристик антенной системы РТ-13 и исследования излучения космических радиоисточников.

Стоит отметить, что для уменьшения потерь при обработке совместных наблюдений целесообразно разрабатывать приемную систему передвижной РСДБ-станции для приема сигналов круговых поляризаций, так как большинство приемных систем РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» работают с круговыми поляризациями. Наименьшее значение шумовой температуры системы для радиотелескопов РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» достигается в *X*-диапазоне частот, целесообразно ориентироваться на этот диапазон при разработке будущей приемной системы. Применение криогенного охлаждения при этом значительно уменьшает шумовую температуру системы. Ширину полосы ПЧ для разрабатываемой приемной системы следует выбрать не менее 1 ГГц.

1.4 Оценка возможности использования компактных антенн для РСДБ-наблюдений с радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО»

В данном случае в качестве критерия возможности использования малых антенн в РСДБ-наблюдениях с радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО» целесообразно использовать отношение сигнал-шум на выходе коррелятора (*SNR*), введенное ранее в параграфе 1.2 и представленное в следующем виде:

$$SNR = \frac{\eta\pi F \cdot 10^{-26} \cdot D_1 D_2}{8k} \sqrt{\frac{\text{КИП}_1\,\text{КИП}_2}{T_{\text{сис1}} T_{\text{сис2}}}} \cdot \sqrt{2\Delta f t}, \quad (1.8)$$

где k — постоянная Больцмана [Дж/К];

D_1 и D_2 — диаметры радиотелескопов [м] принимающих участие в наблюдениях, с соответствующими коэффициентами использования поверхности — КИП_1 и КИП_2;

F — плотность потока радиоисточника [Ян].

Значение *SNR*=7 в данном случае принимаем, как критерий различия отклика на выходе коррелятора на фоне шумов. Целесообразно рассмотреть случаи совместных наблюдений антенны передвижной станции с радиотелескопами РТ-32 и РТ-13 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» в *X*-диапазоне. Для расчета выбраны предельные значения параметров, позволяющие оценить минимальный диаметр зеркала компактной антенны и необходимую шумовую температуру разрабатываемой приемной системы:

– снижающий коэффициент из-за 2-х битового квантования сигналов — $\eta = 0.88$;

– поток источника — $F = 0.2$ Ян выбран из анализа типичного IVS-сеанса IVS-R1875 [38], в приложении А представлен список источников наблюдаемых в сеансе. Порядка 90% источников имеют поток больше 0.2 Ян, 45% — больше 0.5 Ян и всего 15% источников обладают потоком больше 1 Ян;

– в соответствии с принципами, сформулированными в параграфе 1.1 — диаметр малой антенны — D_1 следует брать в пределах 2–4 м;

– полоса частот — $\Delta f = 500$ МГц, определяется системой регистрации компактной антенны. В данном анализе ориентируемся на полосу регистрации радиотелескопа РТ-13;

– *КИП*=0.6 для компактной антенны и РТ-32, *КИП*=0.8 для РТ-13. Стоит отметить, что *КИП* компактной антенны порядка 0.6 накладывает серьезные требования на облучатель и систему облучения поверхности радиотелескопа;

– шумовая температура системы для РТ-32 в *X*-диапазоне — $T_{\text{сис2}}$=40 К;

– шумовая температура системы для РТ-13 в *X*-диапазоне — $T_{\text{сис2}}$=30 К;

– время накопления для данного расчета — $t = 60$ с, обеспечивает необходимую когерентность в *X*-диапазоне частот.

На рисунке 1.10 рассматривается база «РТ-32 — компактная антенна передвижной станции». Представлен график зависимости отношения сигнал-шум *SNR* от шумовой температуры системы $T_{\text{сис}}$ компактной антенны передвижной станции, при разных диаметрах зеркала компактной антенны D_1. Рисунок 1.10 показывает, что на компактной антенне передвижной станции диаметром больше 2 м возможно проведение совместных РСДБ-наблюдений с РТ-32. Шумовая температура приемной системы при этом должна быть около 100 К, что можно достигнуть на неохлаждаемых приемниках. Однако, для передвижных РСДБ-станций целесообразно рассматривать режим совместных наблюдений с радиотелескопами РТ-13, как с более быстроповоротными радиотелескопами.

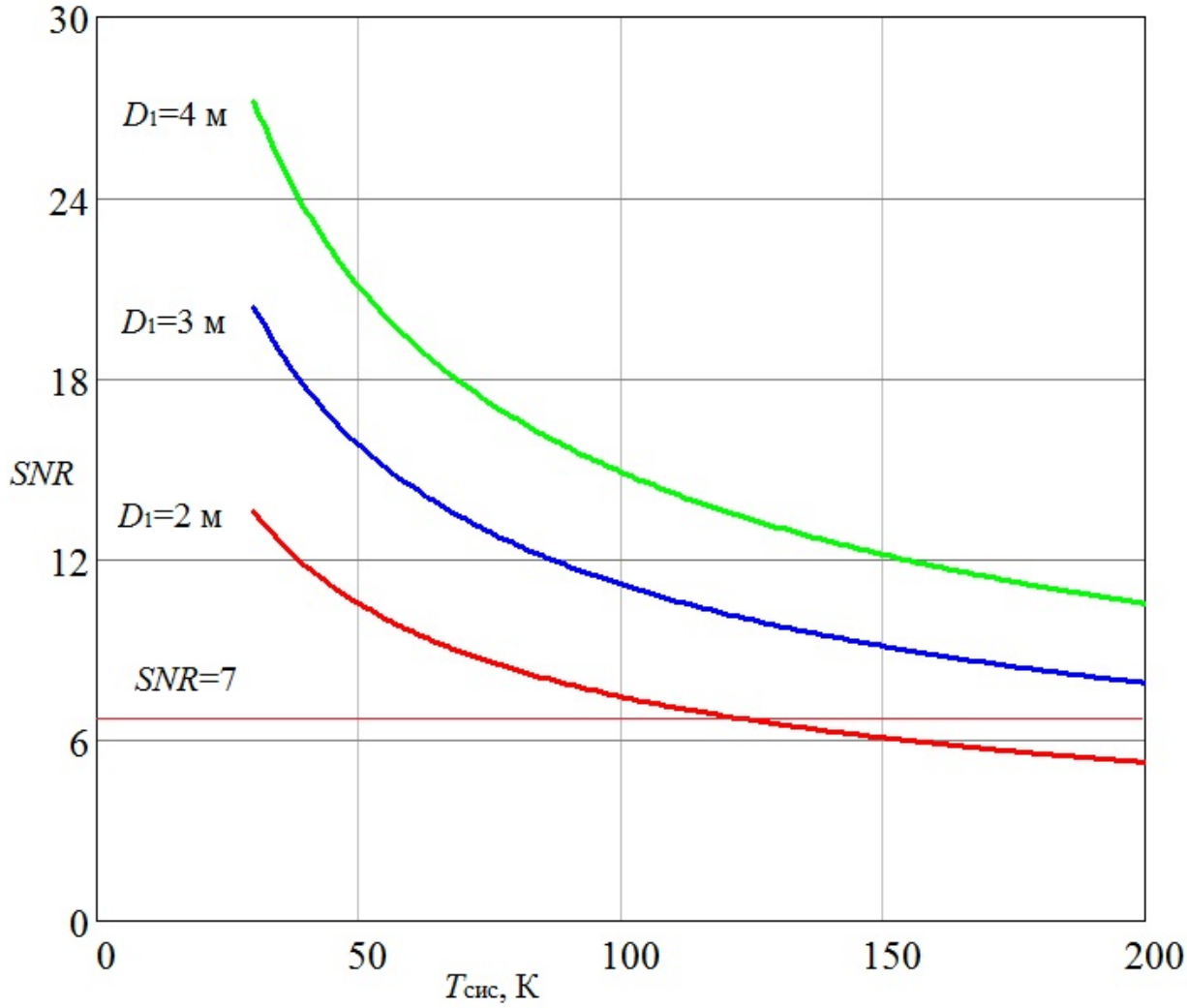


Рисунок 1.10. График зависимости отношения сигнал-шум от шумовой температуры системы компактной антенны для базы «РТ-32 — компактная антенна передвижной станции».

На рисунке 1.11 рассматривается база «РТ-13 — компактная антенна передвижной станции». Представлен график зависимости отношения сигнал-шум *SNR* от шумовой температуры системы $T_{сис}$ компактной антенны передвижной станции, при разных диаметрах зеркала компактной антенны D_1. Из рисунка 1.11 следует, что успешные РСДБ-наблюдения с радиотелескопами РТ-13 возможны при диаметре компактной антенны передвижной станции не менее 4 м при этом шумовая температура системы должна быть не более 60 К, что в свою очередь подразумевает использование криогенного охлаждения входных малошумящих уси-

лителей. Использование МКС невозможно при однозеркальном исполнении антенной системы, а так же нецелесообразно при диаметре антенны менее 3 м.

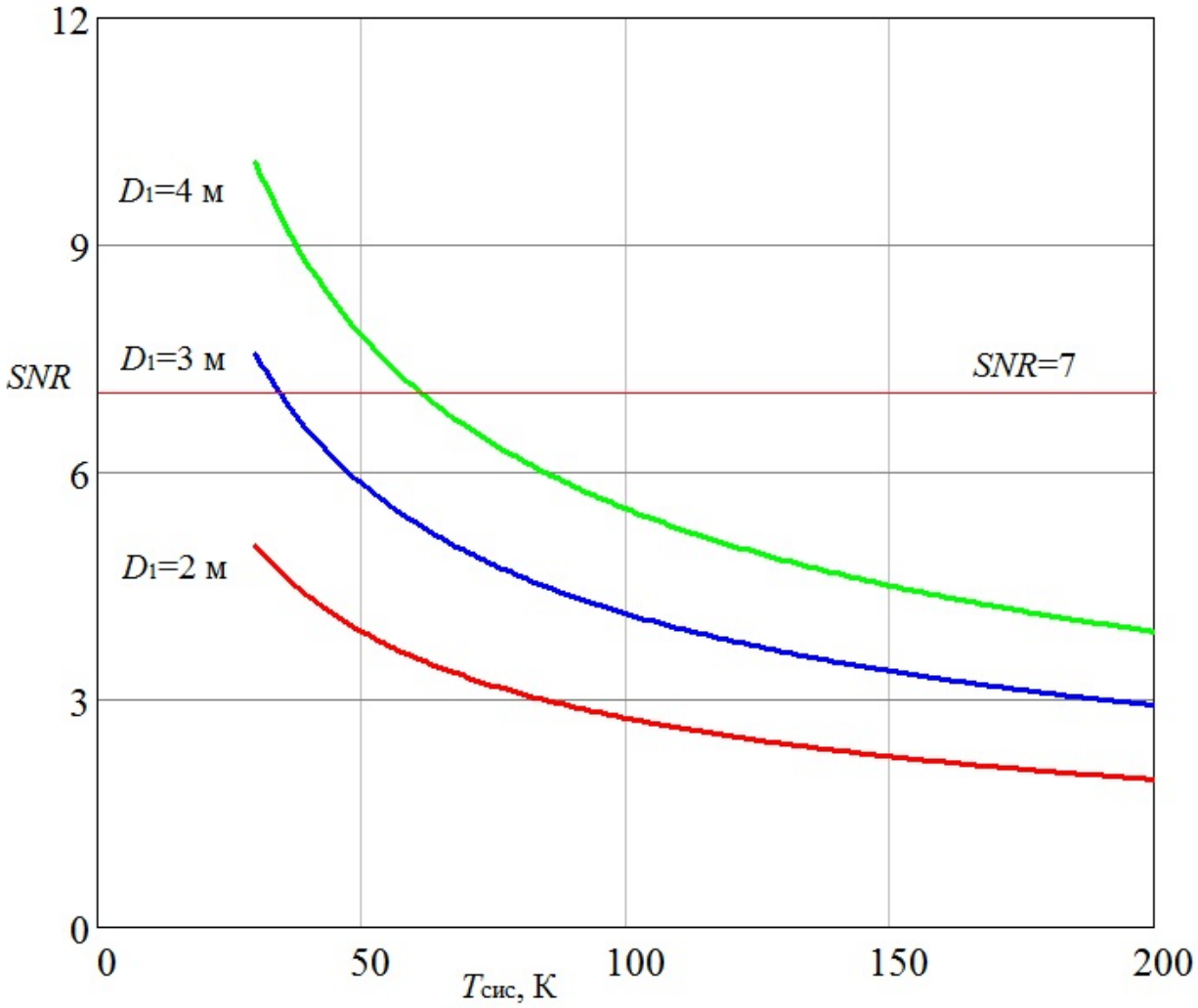


Рисунок 1.11. График зависимости отношения сигнал-шум от шумовой температуры системы компактной антенны для базы «РТ-13 — компактная антенна передвижной станции».

Проведенный расчет позволяет сформулировать следующие требования к диаметру зеркала компактной антенны. Если ориентироваться на работу с радиотелескопами РТ-32, то достаточно антенны диаметром 2 м с одним или двумя зеркалами и неохлаждаемой приемной системой. Более сложный вариант с включением в работу радиотелескопов РТ-13 предусматривает минимальный диаметр зеркала компактной антенны — 4 м и криогенное охлаждение приемной системы. Это возможно реализовать только на двухзеркальной антенной системе.

1.5 Выбор антенной системы для передвижной РСДБ-станции

В данном параграфе будут рассмотрены варианты антенных систем для передвижной РСДБ-станции. В первую очередь начнем анализ с однозеркальной антенны диаметром порядка 2 м. Общий вид такой антенны представлен на рисунке 1.12. В данном случае предполагается осесимметричный параболоид диаметром 1.65 м с приемником в первичном фокусе, *f/d*=0.4 м.

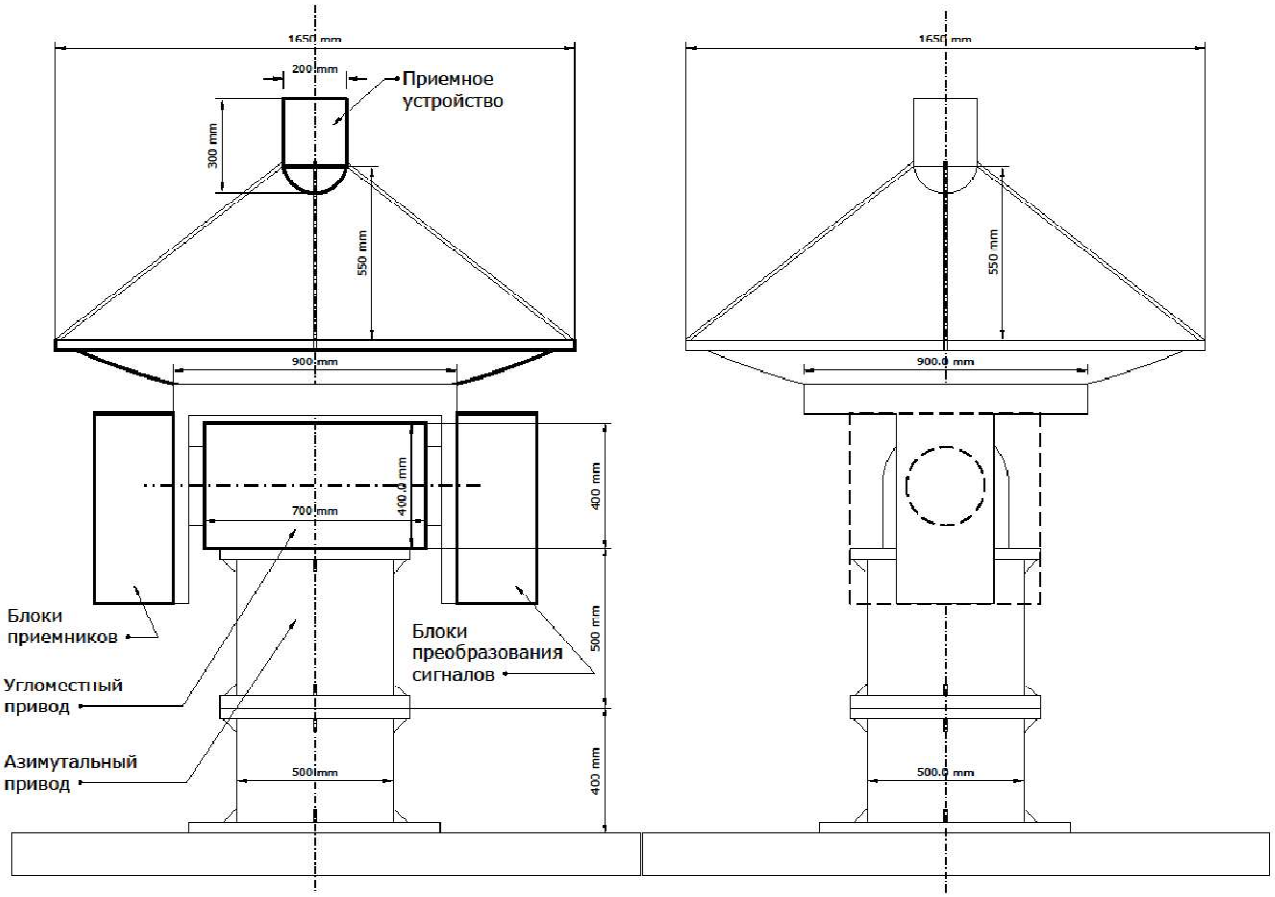


Рисунок 1.12. Общий вид однозеркального радиотелескопа.

Были проведены расчеты параметров однозеркальных радиотелескопов диаметром 1.6 м и 2.4 м в *S* и *X*-диапазонах частот. Методом конечных элементов рассчитаны параметры облучателя, использованы методы физической и геометрической оптики при расчете параметров радиотелескопа. Получены расчетные диаграммы направленности радиотелескопа в *S* и *X*-диапазонах частот, представленные на рисунках 1.13–1.14. При расчете шумовой температуры антенны использовалась модель атмосферы, представленная в работе Jet Propulsion Laboratory (JPL) [39]. Основные характеристики радиотелескопа

приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6. Основные расчетные характеристики однозеркальных радиотелескопов диаметром 1.6 и 2.4 м.

Наименование характеристики	РТ-1.6		РТ-2.4	
Диапазон	*S*	*X*	*S*	*X*
Рабочий диапазон частот, ГГц	2.2–2.6	7.0–9.5	2.2–2.6	7.0–9.5
Поляризация принимаемого сигнала	круговая	круговая	круговая	круговая
Ширина луча по уровню -3 дБ, градус	5.7	1.6	3.8	1.1
КИП	0.62	0.67	0.62	0.67
Шумовая температура антенны $T_{А}$, К	12	16	12	16
Шумовая температура приемника $T_{пр}$, К	116	105	116	105
Шумовая температура системы $T_{сис}$, К	128	121	128	121
SEFD, Ян	280000	250000	125000	110000

Применение однозеркальной антенны в данном радиотелескопе позволит использовать *S*-диапазон и избавиться от затенения связанного с большими размерами контррефлектора в *S*-диапазоне. Однако в однозеркальной антенной системе значительно ограничены размеры приемного фокального контейнера, в данном случае невозможно использование криогенного охлаждения входных усилительных каскадов, что в свою очередь приведет к высоким значениям *SEFD*.

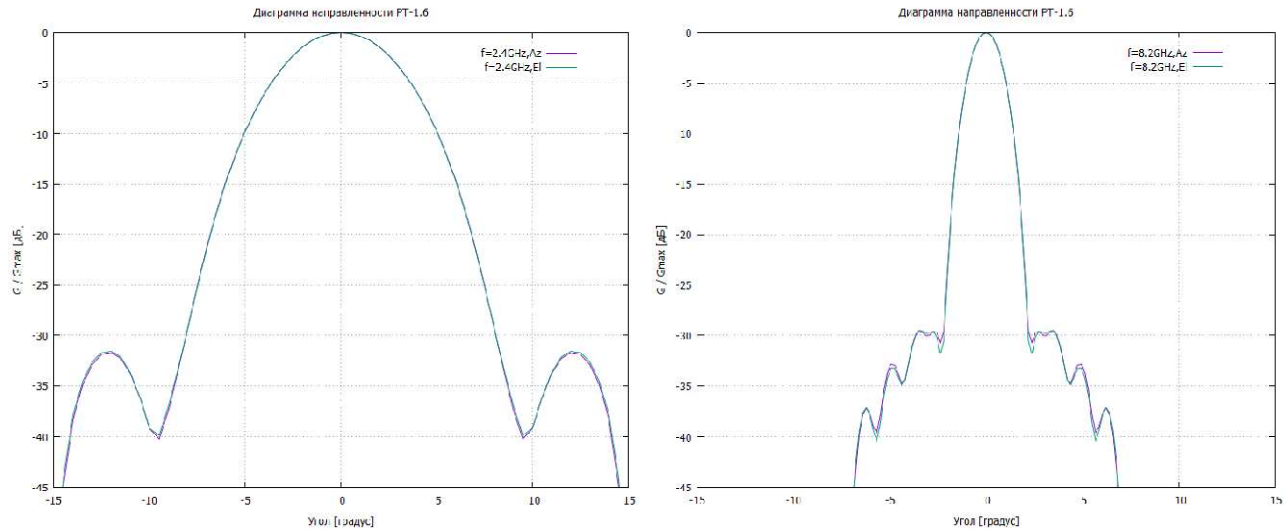


Рисунок 1.13. Диаграммы направленности рефлектора 1.6 м: слева — в *S*-диапазоне, f=2.4 ГГц, $\theta_{3дБ}$=5.7°; справа — в *X*-диапазоне, f=8.2 ГГц, $\theta_{3дБ}$=1.6°.

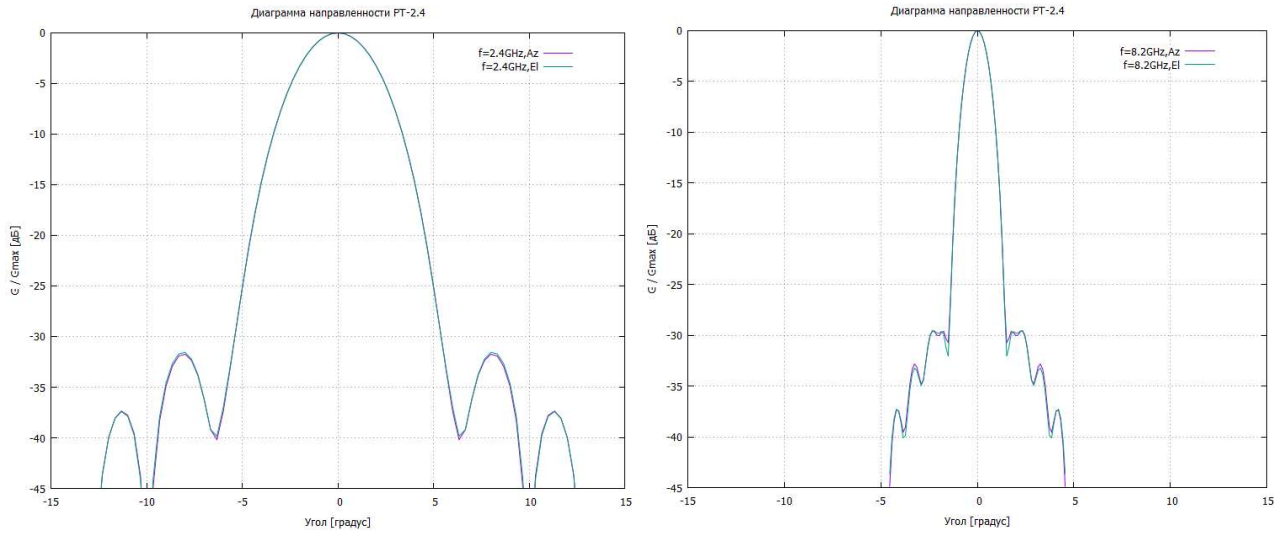


Рисунок 1.14. Диаграммы направленности рефлектора 2.4 м: слева — в *S*-диапазоне, f=2.4 ГГц, $\theta_{3дБ}$=3.8°; справа — в *X*-диапазоне, f=8.2 ГГц, $\theta_{3дБ}$=1.1°.

Также был рассмотрен вариант двухзеркальной антенной системы с диаметром основного зеркала 2.4 м. В данном варианте возможно размещение в фокусе антенной системы криоэлектронного блока с охлаждаемыми до криогенных температур облучателем и малошумящими усилителями, диаметр которого составляет около 0.1 диаметра зеркала радиотелескопа. Для уменьшения затенения поверхности антенной системы криоэлектронным блоком и устранения переотражений, может быть использована двухзеркальная антенная система со смещенной осью параболической образующей главного зеркала. На рисунке 1.15 схематически показана двухзеркальная антенная система с кольцевым фокусом, впервые предложенная J. L. Lee [40]. Образующая рабочей поверхности контррефлектора в такой системе представляет собой сегмент эллипса с фокусами F1 и F2, а образующая главного зеркала — параболу (CD) со смещенной осью (F1C).

Диаметр контррефлектора должен превышать $10\lambda_{max}$, исходя из этого соотношения размер контррефлектора для работы в *S*-диапазоне должен быть порядка 130 см. Соответственно при выборе рабочей полосы приемной системы для такой антенной системы целесообразно отказаться от *S*-диапазона частот или рассмотреть вариант широкополосного приема, к примеру, в полосе 6–16 ГГц. В работе [41] описан широкополосный рупорный облучатель с гребнями — так

называемый Medium-Gain Quad-Ridged Flared Horn (QRFH), работающий в частотной полосе 6:1 и имеющий диаграмму направленности шириной около 56° по уровню минус 15 дБ. Такой облучатель компактен и имеет достаточно хорошее согласование на частотах, превышающих частоту отсечки в 1.4 раза. В ИПА РАН был разработан QRFH облучатель [42] на диапазон 6–16 ГГц. Облучатель имеет четыре продольных ортогональных гребня экспоненциальной формы. Профиль внутренней поверхности рупора также экспоненциальный. Ширина ДН двухзеркальной антенной системы с широкополосной облучающей системой по уровню минус 3 дБ изменяется в пределах от 70 до 26 угловых минут в диапазоне частот 6–16 ГГц. Величина *КИП* в рабочем диапазоне частот антенной системы изменяется от 0.66 на частоте 6 ГГц до 0.56 на частоте 16 ГГц.

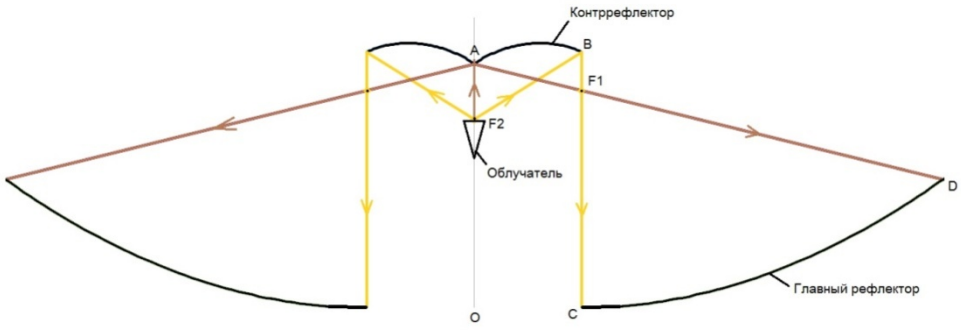


Рисунок 1.15. Двухзеркальная антенная система с кольцевым фокусом.

В рассматриваемом варианте антенной системы предполагается размещение криэлектронного блока в фокусе антенны, однако диаметр главного зеркала, и расстояние между вторичным фокусом и вершиной контррефлектора значительно ограничивают габаритные размеры криоэлектронного блока. В данном случае, для охлаждения входных усилительных каскадов целесообразно рассмотреть криогенную систему Стирлинга, обладающую значительно меньшими размерами в сравнении с системой Джиффорда-МакМагона, но охлаждающую до азотного уровня температур (80 К). Оценка шумовой температуры приемника в таком случае даст значение 55 К в рабочем диапазоне частот. Шумовая температура антенны, учитывая модель атмосферы [39] составит порядка 12 К, значение *SEFD* при этом будет находится в диапазоне 57000–67000 Ян.

Обзор зарубежной литературы показал, что для передвижных РСДБ-станций применяются антенные системы с большим диаметром зеркала (нежели 1–3 м), так в проекте TIGO используется антенна с 6-ти метровым основным зеркалом, позволяющая получить значение *SEFD* порядка 10000 Ян [12]. С учетом результатов полученных в параграфе 1.4 целесообразно рассмотреть антенную систему передвижной станции с диаметром зеркала более 4 м, что позволит осуществить полноценное включение передвижной РСДБ-станции в состав комплекса «Квазар-КВО».

В распоряжении ИПА РАН имеется выведенная из эксплуатации наземная спутниковая станция (НСС) TESLA S11 DD 424 [43] с диаметром основного зеркала 4.3 м, ее антенную систему можно использовать в качестве основы для радиотелескопа передвижной РСДБ-станции. На рисунке 1.16 представлена антенная система НСС TESLA S11 DD 424.

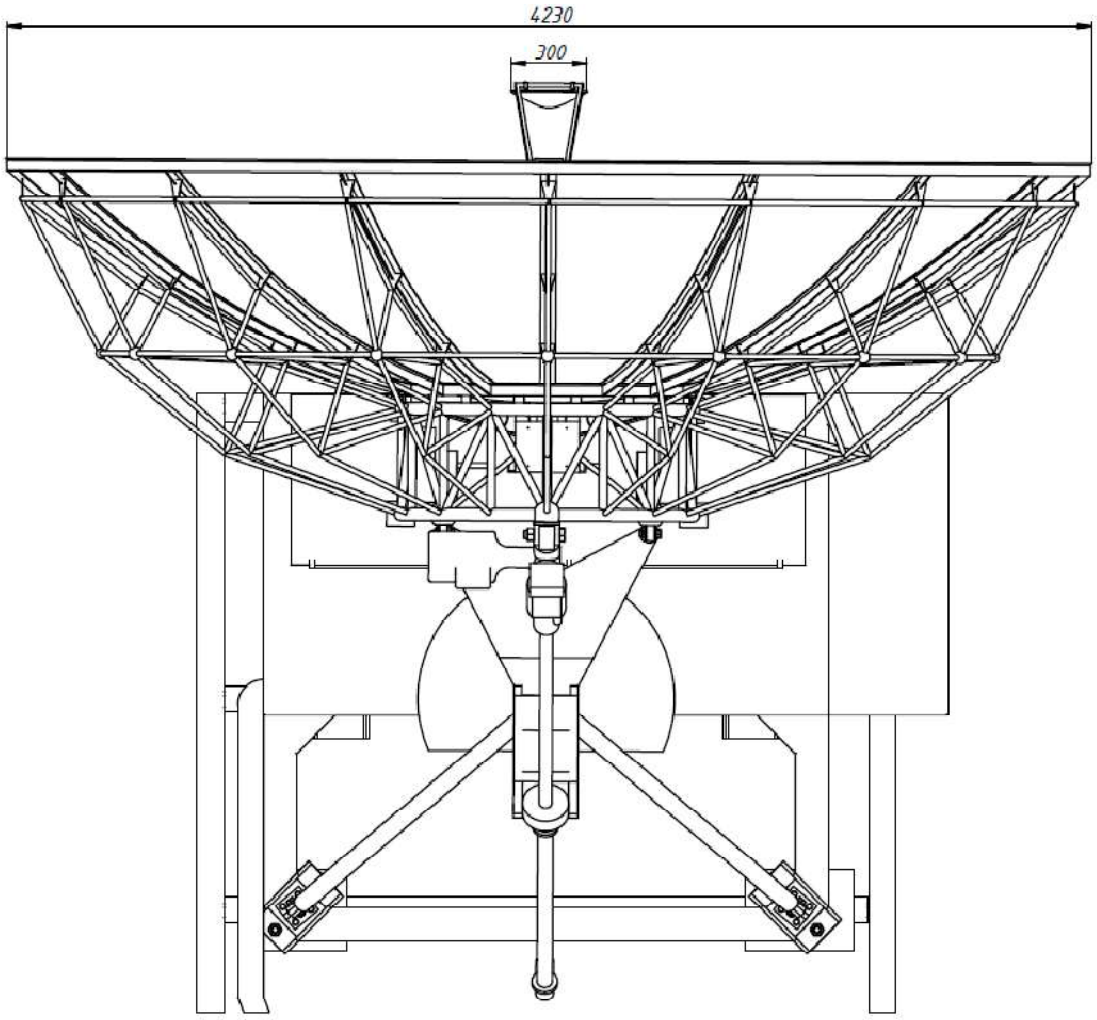


Рисунок 1.16. Антенная система НСС TESLA S11 DD 424.

Технические характеристики антенной системы НСС приведены в таблице 1.7. Скорость движения по азимуту и углу места гарантированно обеспечивает сопровождение источников радиосигнала (квазаров), используемых в РСДБ-наблюдениях. Антенная система НСС изначально работала в диапазоне частот 11–14 ГГц [43]. С учетом предлагаемой геометрии облучения (Рисунок 1.16) и качества поверхности антенная система гарантировано обеспечит работу в диапазоне 8.0–12.0 ГГц, что соответствует хорошо изученному и часто используемому в РСДБ *X*-диапазону длин волн и позволяет достигнуть теоретически минимально возможную для данной антенны шумовую температуру системы.

Таблица 1.7. Технические характеристики НСС TESLA S11 DD 424.

Характеристика	Значение
Диаметр основного зеркала	4.23 м
Диаметр контррефлектора	300 мм
Фокусное расстояние	1185.5 мм
Перемещение по азимуту	±40 градусов
Перемещение по углу места	0–80 градусов
Скорость перемещения антенны	1±10% угл.мин./с
Погрешность наведения антенны	не более 3 угловых минут
Масса основного зеркала	340 кг
Масса фидера	18 кг
Масса опорно-поворотного устройства	830 кг
Масса транспортного состояния	1250 кг
Масса аппаратуры в фокусе антенны	не более 5 кг
Масса аппаратуры в подзеркальном пространстве	не более 70 кг

Существенным ограничением для использования НСС TESLA в качестве прототипа РСДБ-радиотелескопа является малая скорость перемещения по углу

места и азимуту, а также ограниченный диапазон перемещения по азимуту. Тем не менее, указанные ограничения несущественны при отработке концепции передвижной РСДБ-станции и могут быть частично устранены при использовании соответствующей процедуры планирования РСДБ-наблюдений.

Габаритные размеры антенной системы, в том числе подзеркального пространства, позволяют разместить на этой антенне приемную систему с микрокриогенной системой Джиффорда-МакМагона с охлаждением входных усилительных каскадов до водородного уровня температур (14 К). Это позволит рассчитывать на снижение шумовой температуры приемника до 35 К. При этом возможно добиться шумовой температуры системы порядка 50 К, что при реализации *КИП*=0.6 обеспечит значение *SEFD*=15000 Ян. В таблице 1.8 приведены расчетные характеристики для всех типов антенны, описанных в данной главе.

Таблица 1.8. Основные расчетные характеристики радиотелескопов для передвижной РСДБ-станции.

Характеристика	Однозеркальный				Двухзеркальный	
Диаметр антенны,м	1.6		2.4		2.4	4.3
Диапазон частот, ГГц	*S* (2.2–2.6)	*X* (7.0–9.5)	*S* (2.2–2.6)	*X* (7.0–9.5)	6–16	*X* (8.0–9.0)
Поляризация	круговая	круговая	круговая	круговая	линейная	круговая
Ширина луча по уровню -3 дБ, градус	5.7	1.6	3.8	1.1	1.2–0.5	0.5–0.6
КИП	0.62	0.67	0.62	0.67	0.66–0.56	0.6
Криогенная система охлаждения	нет		нет		Стирлинг	Джиффорд-МакМагон
Шумовая температура антенны, К	12	16	12	16	12	16
Шумовая температура приемника, К	116	105	116	105	55	35
Шумовая температура системы, К	128	121	128	121	67	51
SEFD, Ян	280000	250000	125000	110000	57000–67000	15000

Стоит отметить, что размеры контррефлектора не позволят осуществить прием радиосигналов в *S*-диапазоне. Ионосфера Земли оказывает влияние на

распространение, принимаемых радиотелескопами, сигналов от радиоисточников. В РСДБ-наблюдениях с целью точного определения параметров вращения Земли (ПВЗ) или других параметров необходимо учитывать влияние ионосферы. Обычно для этого используется двухдиапазонный прием радиосигнала, например на длинах волн: 3.5 см (*X*-диапазон) и 13 см (*S*-диапазон). В дальнейшей обработке используются данные *X*-диапазона, а по данным *S*-диапазона вычисляется ионосферная задержка сигнала, которая используется во вторичной обработке РСДБ-наблюдений. В ситуации с РТ-4, когда РСДБ-наблюдения проводятся в одном диапазоне и необходимо вычислить ионосферную задержку без использования данных *S*-диапазона, оценка вклада ионосферы может быть проведена на основе данных об электронной концентрации total electron content (TEC), полученных из наблюдений спутников GPS/GLONASS [44].

Таким образом, на основе проведенного анализа было принято решение использовать НСС TESLA в качестве прототипа для радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции. Оценка текущего состояния НСС TESLA в обсерватории «Светлое» позволила использовать механическую часть (зеркальную систему, опорно-поворотное устройство с электродвигателями привода) без существенных доработок. В силу принципиальных различий в алгоритме наведения и сопровождения источника радиосигнала от геостационарных аппаратов и естественных источников было необходимо заменить инкрементные датчики положения и управление электроприводом, а также доработать алгоритм сопровождения. Оснащение НСС TESLA новыми датчиками положения и замена аппаратной части системы управления электроприводом позволили достигнуть необходимой точности сопровождения в совокупности с динамическими характеристиками антенны. В таблице 1.9 представлены результаты модернизации позволяющие говорить о возможности использования механической части НСС TESLA в качестве прототипа для радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции при соответствующем процессе планирования наблюдений с учетом особенностей полученных характеристик антенны.

Таблица 1.9. Параметры механической части антенной системы РТ-4

Характеристика	Значение
Перемещение по азимуту	±40 градусов
Перемещение по углу места	0–80 градусов
Погрешность наведения антенны	не более 20’’
Скорость перемещения антенны	не менее 3’/с

Определившись с антенной системой радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции, для проведения наблюдений необходимо в первую очередь решить задачу оснащения прототипа приемной системой с облучателем. Сформируем требования к разрабатываемой приемной системе с учетом вышеизложенных расчетов, особенностей антенны и принципов построения радиоастрономических приемных систем для РСДБ-радиотелескопов.

1.6 Выводы

Для отработки концепции передвижной РСДБ-станции в данный момент лучшим решением является использование антенной системы HCC TESLA с диаметром основного зеркала 4.3 м. Приемная система для радиотелескопа РТ-4 должна удовлетворять следующими требованиям:

– Совместимость по основным характеристикам с приемными системами отечественных радиотелескопов, работающих в РСДБ-сети «Квазар-КВО» [25,32,35] и соответствие возможностям антенной системы РТ-4 [43].

– Выбор диапазона принимаемых частот сделан в пользу хорошо зарекомендовавшего себя в РСДБ *X*-диапазона длин волн (8.2–9.1 ГГц). Данный диапазон длин волн позволяет достигнуть минимальную теоретически возможную для антенны РТ-4 шумовую температуру системы и нивелирует конструктивные недостатки антенной системы.

– Обеспечение одновременного приема сигналов двух круговых поляризаций (RCP и LCP), обусловленное совместимостью с существующими приемными системы комплекса «Квазар-КВО» и конструктивными особенностями.

– Шумовая температура системы радиотелескопа РТ-4 не должна превышать значения порядка 50 К для обеспечения возможности РСДБ-наблюдений радиоисточников с потоком 0.2 Ян. При этом шумовая температура приемной системы должна быть не более 35 К.

– Наличие микрокриогенной системы для обеспечения требуемой шумовой температуры приемной системы.

– Полоса промежуточных частот должна совпадать с полосами существующих системам регистрации [45, 46]. Выходной уровень мощности должен быть достаточным для применяемой системы регистрации сигнала.

– Возможность амплитудной и фазовой калибровки приемного тракта.

– Должна быть обеспечена когерентность частотных преобразований сигналов в разрабатываемой приемной системе.

– Обеспечение высокой стабильности характеристик приемно-регистрирующей аппаратуры, в том числе с помощью применения системы термостабилизации.

– Наличие автоматической системы, обеспечивающей контроль и управление каждого блока и каждой системы, входящей в приемную систему.

– С учетом габаритов антенной системы РТ-4 вес аппаратуры в фокальном пространстве, заключенный в цилиндрическом объеме с диаметром порядка 110 мм, должен составлять не более 5 кг. Вес аппаратуры в подзеркальном пространстве не более 70 кг. Аппаратура приемной системы должна быть распределена по доступному объему фокального пространства, подзеркального пространства и антенного контейнера с минимальными потерями в характеристиках приемной аппаратуры.

– Чувствительность приемной системы должна обеспечивать возможность наблюдения эталонных радиоисточников для фокусировки и измерения параметров радиотелескопа.

Глава 2. Разработка приемной системы передвижной РСДБ-станции

В первой главе были сформированы требования к характеристикам разрабатываемой приемной системы (ПС) для радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции. Малые габариты антенной системы РТ-4 предъявляют особые требования к структуре и компоновке блоков приемной системы. В первую очередь, необходимо определить какая часть аппаратуры ПС будет размещена в фокальной области, в подзеркальном пространстве, а какая в антенном контейнере. Также необходимо определиться с размерами блоков и способом их соединений, кроме того необходимо учитывать размещение микрокриогенной системы (МКС), системы регистрации и системы частотно-временной синхронизации (СЧВС).

Создание приемной системы для передвижной РСДБ-станции потребовало решения следующих задач:

– Разработка функциональной схемы приемной системы с учетом всех сформулированных требований.

– Создание виртуальной трехмерной модели разрабатываемой приемной системы, что позволит учесть факторы ее размещения на радиотелескопе передвижной станции.

– Разработка составных частей приемной системы согласно выбранной функциональной схеме.

– Исследование характеристик, как отдельных составных частей разработанной приемной системы, так и ее характеристик в целом, включая отработку взаимодействия с системами регистрации и частотно-временной синхронизации.

– Доработка антенной системы РТ-4 для осуществления возможности установки разработанной ПС с учетом уменьшения вносимых потерь и сохранения жесткости конструкции.

– Установка приемной системы и сопутствующей аппаратуры на антенне РТ-4.

Итак, перейдем к проработке схемы приемной системы, разделению функций отдельных ее блоков и моделированию размещения этих блоков на антенной системе РТ-4 исходя из сформированных требований к характеристикам ПС.

2.1 Функциональная схема приемной системы

Специфические размеры фокального пространства позволяют разместить в нем только облучатель-рупор ограниченного объема. При этом необходимо с наименьшими потерями обеспечить передачу сигнала от рупора к последующим усилительным каскадам, которые с учетом криогенного охлаждения могут быть размещены только в подзеркальном пространстве. С учетом всех этих факторов и выбранной в первой главе рабочей полосы частот (8.2–9.1 ГГц) оптимальным решением является использование волновода круглого сечения в качестве средства передачи сигнала от рупора, расположенного в фокусе антенны, до усилительных каскадов в подзеркальном пространстве. Целесообразно в подзеркальном пространстве также разместить и блоки, отвечающие за преобразование сигнала в полосу ПЧ, а также аппаратуру амплитудной и фазовой калибровки (при условии соблюдения требований к массе и объему аппаратуры размещаемой в подзеркальном пространстве). В таком случае аппаратура СЧВС, системы регистрации и системы управления и электропитания будут размещены в антенном контейнере, в непосредственной близости от антенны.

Стоит также отметь, что современная элементная база позволила значительно снизить флуктуации коэффициента усиления приемного тракта, негативно влияющие на чувствительность радиометра. Кроме того все же основным режимом работы разрабатываемой приемной системы является радиоинтерферометрический режим. Таким образом, при выборе схемы радиометра можно отказаться от значительно более сложной схемы радиометра с пилот-сигналом (модуляционной) в пользу схемы радиометра полной мощности. На основе сформулированных выше требований функциональная схема приемной системы может быть представлена в следующем виде (см. рисунок 2.1).

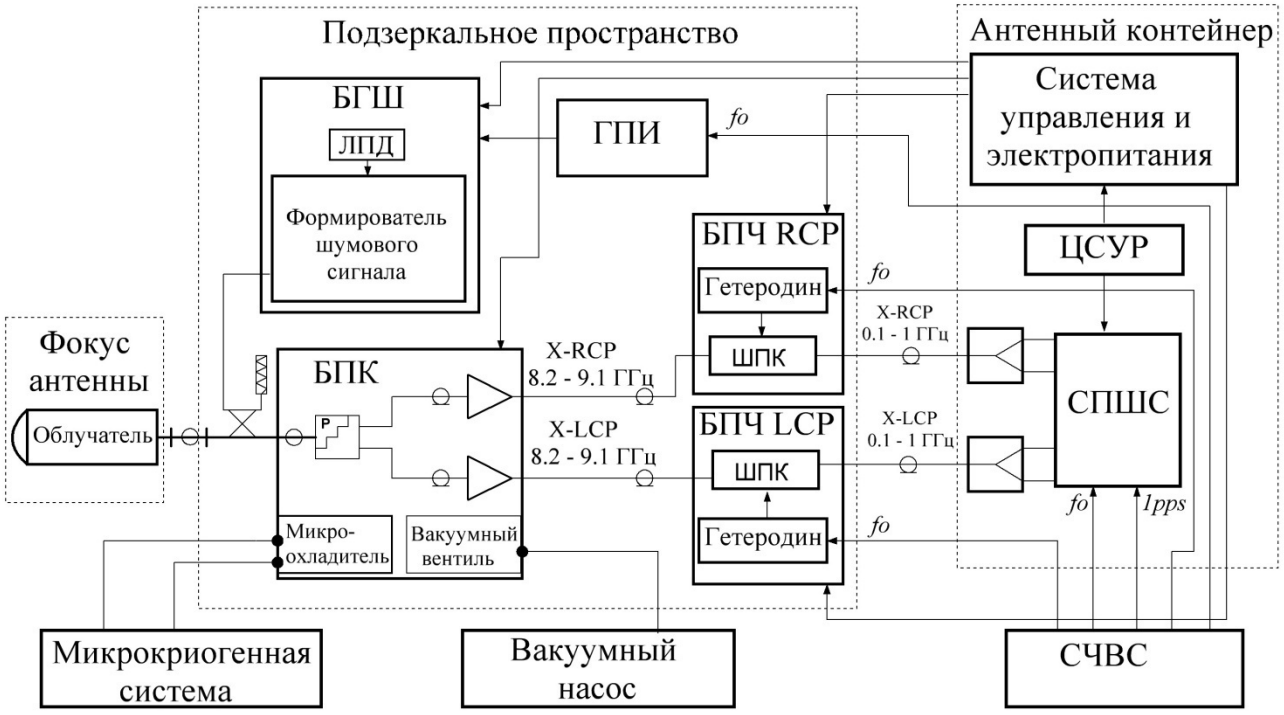


Рисунок 2.1. Функциональная схема разработанной приемной системы вместе с системами преобразования широкополосных сигналов и частотно-временной синхронизации, ЦСУР—центральная система управления радиотелескопом.

Рассмотрим кратко принцип работы ПС, разделение функций по отдельным блокам и размещение блоков на антенной системе. В фокусе антенны размещается облучатель — скалярный рупор, разработанный в ИПА РАН для антенны РТ-4. Облучатель обеспечивает прием сигналов правой и левой круговой поляризации (RCP и LCP) в диапазоне длин волн 8.2–9.1 ГГц. Посредством волноводного тракта круглого сечения принимаемый сигнал с облучателя поступает на волноводный вход блока приемного криостатируемого (БПК).

В БПК сигнал поступает на разделитель поляризаций и с его выходов подается на охлаждаемые малошумящие усилители (МШУ). Для охлаждения разделителя поляризаций и МШУ до водородного уровня температуры (15 К) с целью снижения потерь и уменьшения шумовой температуры ПС используется микрокриогенная система (МКС). Непосредственно перед БПК расположен направленный ответвитель для ввода сигналов амплитудной и фазовой калибровок во входной СВЧ-тракт. Сигналы калибровок формируются в блоке

генераторов шума (БГШ) и генераторе пикосекундных импульсов (ГПИ). Источником сигнала амплитудной калибровки в БГШ служит малогабаритный широкополосный полупроводниковый генератор шума на лавинно-пролетном диоде (ЛПД).

С выходов БПК сигналы поступают в БПЧ, по одному для каждой поляризации. БПЧ включает в себя микросборку широкополосного преобразовательного канала (ШПК), микросборку гетеродина, систему термостабилизации и платы вторичных источников питания. В нем высокочастотный сигнал усиливается и переносится в диапазон промежуточных частот. БПК, БГШ и БПЧ располагаются в подзеркальном пространстве антенны.

Сигналы с выходов соответствующих БПЧ по радиочастотным кабелям поступают на делители мощности и соответствующие входы широкополосной системы преобразования и регистрации сигналов (СПШС). Система управления и электропитания, СПШС и часть блоков СЧВС располагаются в антенном контейнере вблизи антенны РТ-4.

В соответствии с представленной на рисунке 2.1. схемой для создания высокочувствительной приемной системы необходимо выполнить разработку следующих узлов:

– Облучатель с СВЧ-трактом.

– Блок приемный криостатируемый.

– Блок преобразования частоты.

– Блок генераторов шума.

– Система управления и электропитания (включающая блок связи и блоки питания).

Кроме того необходимо разработать и изготовить специальную конструкцию для размещения приемной аппаратуры в подзеркальном пространстве радиотелескопа, позволяющую обеспечить сопряжение волноводного тракта с входом БПК, т.е. в конструкции должна быть предусмотрена регулировка положения БПК в трех плоскостях с возможностью его поворота по трем осям.

2.2 Облучатель и входной СВЧ-тракт

Для обеспечения приема сигналов от космических радиоисточников в заданной полосе частот (8.2–9.1 ГГц) в ИПА РАН, для радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции, был разработан и изготовлен облучатель *X*-диапазона длин волн, конструкция облучателя и его соединение с волноводным СВЧ-трактом представлена на рисунке 2.2.

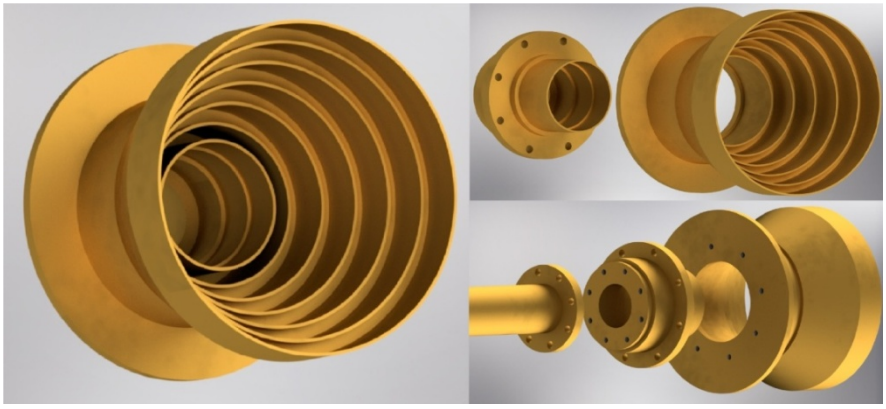


Рисунок 2.2. Конструкция облучателя *X*-диапазона разработанной ПС для РТ-4.

Отсутствие возможности регулировки положения контррефлектора радиотелескопа привело к необходимости разрабатывать данный облучатель с фазовым центром в той же точке, что и старый (штатный облучатель НСС TESLA) при этом во избежание затенения размеры облучателя ограничивались диаметром 105 мм. При разработке рупора основной упор был сделан на оптимизацию ширины ДН по критерию максимума отношения *КИП* к шумовой температуре системы. Вследствие конфигурации антенной системы РТ-4 этот критерий не мог быть выполнен полностью. Проведенные расчеты показали, что ширина ДН в 50° по уровню –10 дБ соответствует практически максимальному значению *КИП* антенной системы РТ-4 и является оптимальной для данной антенной системы [47]. На рисунке 2.3. представлены расчетные диаграммы направленности (ДН) облучателя в рабочем диапазоне частот.

Разработанный облучатель *X*-диапазона представляет собой конический скалярный рупор, внешний диаметр которого составляет 104.5 мм, что в свою очередь позволяет поместить его в штатный фокальный контейнер

радиотелескопа РТ-4 (диаметр фокального контейнера 110 мм). Рупор рассчитан таким образом, чтобы при установке в штатный фокальный контейнер его фазовый центр был совмещен с вторичным фокусом антенной системы РТ-4 (Рисунок 2.4).

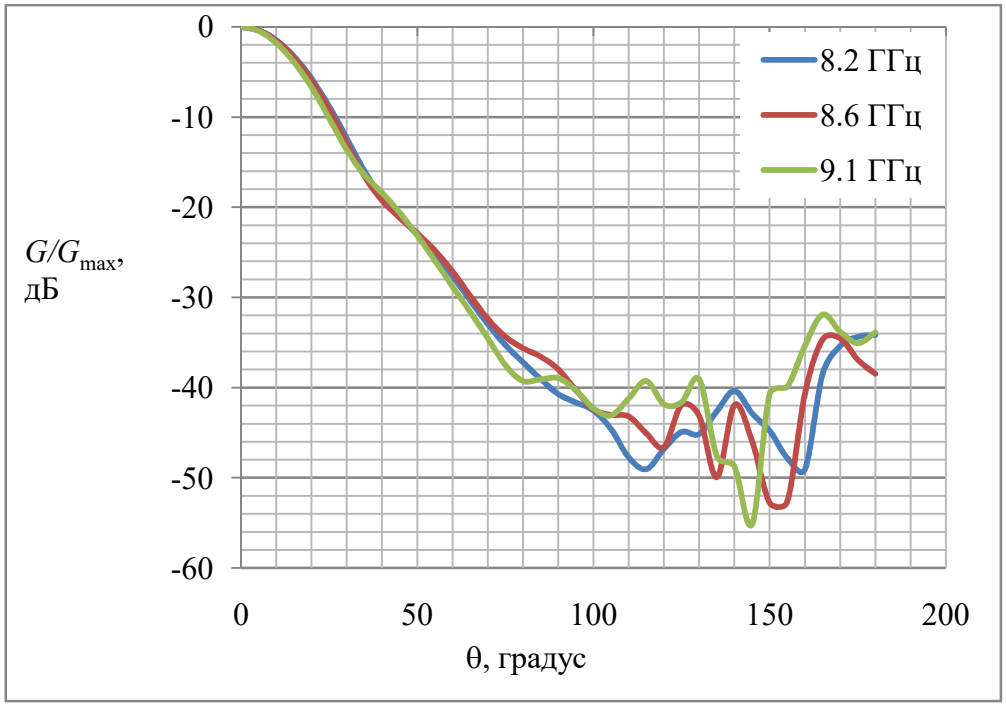


Рисунок 2.3. Расчетные диаграммы направленности облучателя на частотах 8.2, 8.6 и 9.1 ГГц.

В связи с тем, что диаметр разработанного рупора больше диаметра штатного облучателя НСС TESLA (РТ-4) в фокальном контейнере было сделано новое радиопрозрачное окно из фторопласта. Потери сигнала, связанные с поглощением радиоволн в радиопрозрачном окне, будут учтены при расчете вкладов в шумовую температуру приемной системы в следующем параграфе главы.

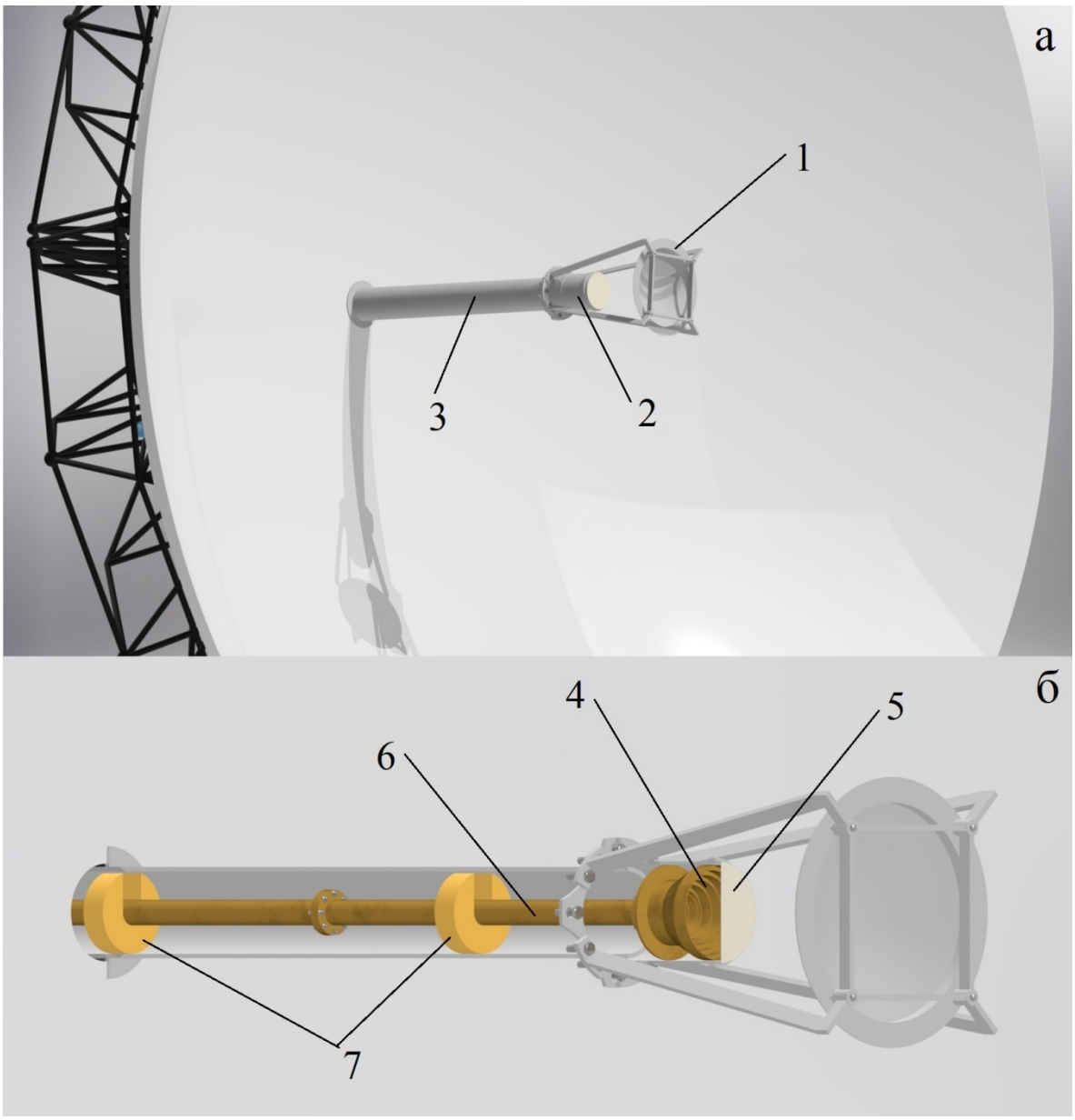


Рисунок 2.4. Антенная система РТ-4. (а) — вторичный фокус; (б) — конструкция разработанной облучающей системы РТ-4. 1 — контррефлектор, 2 — фокальный контейнер, 3 — фидерная труба, 4 — скалярный рупор, 5 — радиопрозрачное окно, 6 — волноводный СВЧ-тракт, 7 — фиксирующие крепления СВЧ-тракта.

Для обеспечения передачи принимаемого сигнала от рупора к блоку приемному криостатируемому (БПК) использован волноводный тракт круглого сечения длиной 1 м. Технологически тракт состоит из трех отрезков волновода с внутренним диаметром 25 мм. Это обеспечивает передачу волн типа TE_{11} двух поляризаций с малыми потерями и препятствует распространению волн высших типов во всем рабочем диапазоне частот приемной системы [48]. Дополнительные

волноводные соединения вносят крайне нежелательные потери, но обусловлены технологическими трудностями изготовления, конструктивными особенностями антенной системы и особенностями монтажа.

Оценим потери сигнала в волноводном СВЧ-тракте. Согласно [49] для волновода круглого сечения коэффициент ослабления для волн типа TE_{mn} может быть рассчитан по следующей формуле:

$$\alpha_{mn} = \frac{R_{\text{пов}}}{Z_c r \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}} \cdot \left(\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2 + \frac{m^2}{\mu_{mn}^2 - m} \right), \tag{2.1}$$

где $R_{\text{пов}}$ — поверхностное сопротивление, $R_{\text{пов}} = \sqrt{\frac{\omega \mu_a}{2\sigma}}$, μ_a — абсолютное значение магнитной проницаемости среды, ω — угловая частота, σ— удельная проводимость металла (с учетом покрытия); Z_c — характеристическое сопротивление; r — радиус волновода; λ — длина волны; $\lambda_{\text{кр}}$ — критическая длина волны, для волн типа TE_{11} $\lambda_{\text{кр}} = 3.41r$; μ_{mn} — корень функции Бесселя, для волн типа TE_{11} μ_{mn}=1.84. Учитывая, что характеристическое сопротивления для волн типа TE может быть записано в виде:

$$Z_c^H = \frac{\omega \mu_a}{\gamma} = \frac{Z_c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2}}, \tag{2.2}$$

где γ — постоянная распространения; μ_a — абсолютное значение магнитной проницаемости среды; ω — угловая частота. Представим выражение (2.1) для волн типа TE_{11} в следующем виде:

$$\alpha_{\text{TE}_{11}} = \frac{\sqrt{\omega \frac{\varepsilon_0}{2\sigma}}}{r \cdot \left(1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2\right)} \cdot \left(\left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}}\right)^2 + 0.42 \right), \tag{2.3}$$

при этом потери (затухание) в волноводе оцениваются, как $L = 8.68\alpha_{TE_{11}} l$ [дБ], где l — длина волновода. Таким образом, затухание в волноводном СВЧ-тракте длиной 1 м составит L=0.147 дБ для длины волны 3.5 см. Стоит отметить, что на практике потери увеличатся за счет утечки мощности через зазор между фланцами волновода [50]. Потери во входном СВЧ-тракте являются определяющими для шумовой температуры приемной системы, поэтому крайне важно точно определить их значение.

Для измерения потерь волноводного тракта были разработаны и изготовлены коаксиально-волноводные переходы (КВП), в качестве средства измерения использовался векторный анализатор цепей Rohde&Schwarz ZVA40. На рисунке 2.5 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) волноводного СВЧ-тракта, как видно из графика среднее значение ослабления L в рабочем диапазоне частот (8.2–9.1 ГГц) составляет 0.16 дБ, что хорошо согласуется с теоретическим расчетом, приведенном ранее. В следующем параграфе потери в волноводном тракте будут учтены при рассмотрении вкладов различных узлов в шумовой температуру приемной системы.

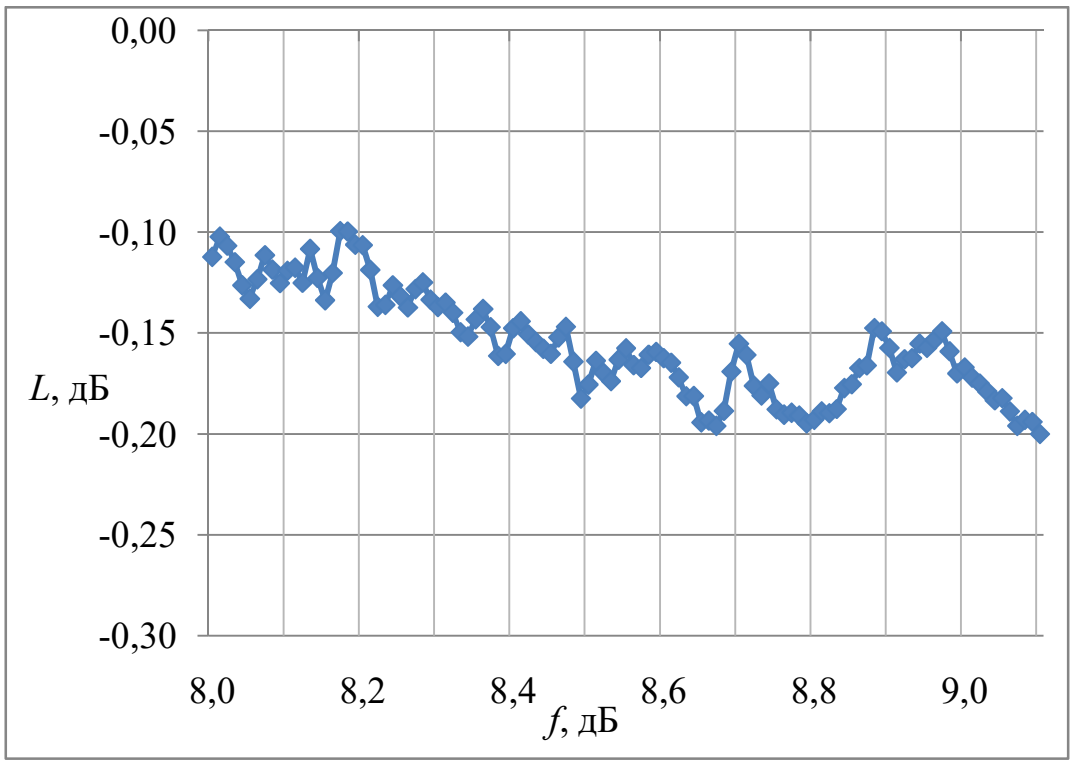


Рисунок 2.5. АЧХ волноводного СВЧ-тракта приемной системы РТ-4.

Для фиксации волноводного тракта и во избежание излишнего механического воздействия на фланцы волноводов и рупора предусмотрены фиксирующие крепления. Осушение волноводного тракта осуществляется с помощью волноводного дегидратора ДВР-01, ввод сухого воздуха происходит через специальный штуцер. Дегидратор располагается в антенном контейнере. Волноводный тракт и рупор изготовлены из латуни и имеют серебряное покрытие толщиной 9 мкм (рисунок 2.6).

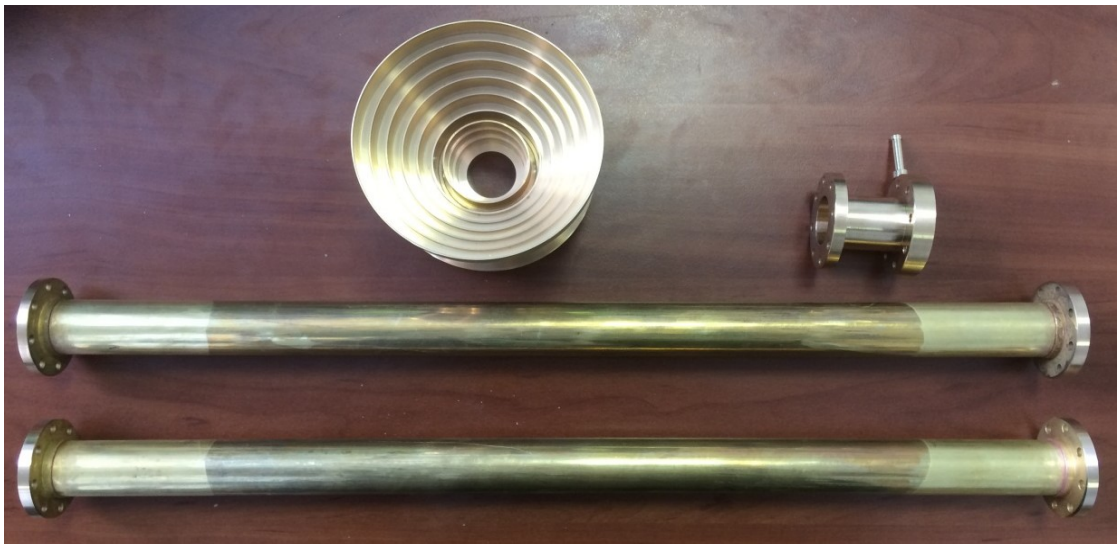


Рисунок 2.6. Скалярный рупор и волноводный СВЧ-тракт приемной системы РТ-4.

Кроме потерь в СВЧ-тракте другой немаловажной характеристикой входного тракта является — осевой коэффициент эллиптичности, причем данную характеристику целесообразно измерять совместно с рупором и БПК. При этом необходимо провести измерения диаграммы направленности (ДН) рупора, форма которой позволит оценить переоблучение (перелив на кромках контррефлектора). Для измерения характеристик рупора и СВЧ-тракта в лабораторных условиях был создан измерительный стенд (рисунок 2.7), включающий:

– измеряемый облучатель — скалярный рупор (2), подключенный непосредственно к волноводному входу БПК (1), где осуществлялось разделение принимаемого сигнала по поляризациям и усиление (при измерении диаграммы направленности БПК и рупор устанавливались на поворотный стол (3));

– передающий облучатель (4), установленный на поворотную стойку, позволяющую вращать облучатель в трех плоскостях;

– подключенный к передающему облучателю аналоговый генератор СВЧ-сигналов Agilent E8257D;

– к выходу БПК был подключен скалярный анализатор цепей Agilent 8757D осуществляющий регистрацию принимаемого сигнала. Анализатор и генератор были соединены по интерфейсу GPIB.

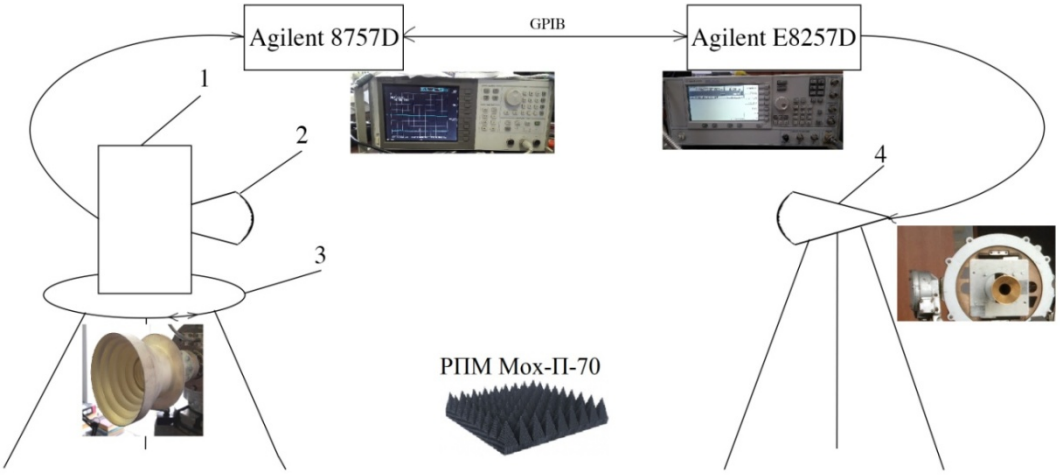


Рисунок 2.7. Стенд для измерения характеристик рупора и СВЧ-тракта.

Принимающий и передающий облучатель находились на расстоянии соответствующем дальней зоне для скалярного рупора ($r \gg \frac{2D^2}{\lambda}$, где D=104.5 мм, λ=3.5 см). При этом во избежание лишних переотражений при поляризационных измерениях расстояние было ограничено 3.5 м. Кроме того, с целью уменьшения переотражений сигнала на полу между облучателями был уложен радиопоглощающий материал (РПМ) Мох–П–70.

Измерения ДН скалярного рупора проводились на частотах 8.2, 8.6 и 9.1 ГГц для правой и левой круговых поляризаций (RCP и LCP). На рисунке 2.8. представлены измеренные ДН скалярного рупора. Ширина ДН по уровню минус 10 дБ составляет 51–54°, что соответствует расчетным значениям. В данном случае по измеренной ДН оценено отношение мощности принятой вне диапазона углов соответствующего оптимальному облучению контррефлектора — 50°, то есть в углах соответствующих затеканиям за кромки контррефлектора к полной принимаемой мощности. Данная оценка показала, что перелив за кромки контррефлектора составляет значение порядка 10%, что в худшем случае (случай

установки антенны в горизонт) увеличит антенную температуру на 6 К, то есть до 22 К.

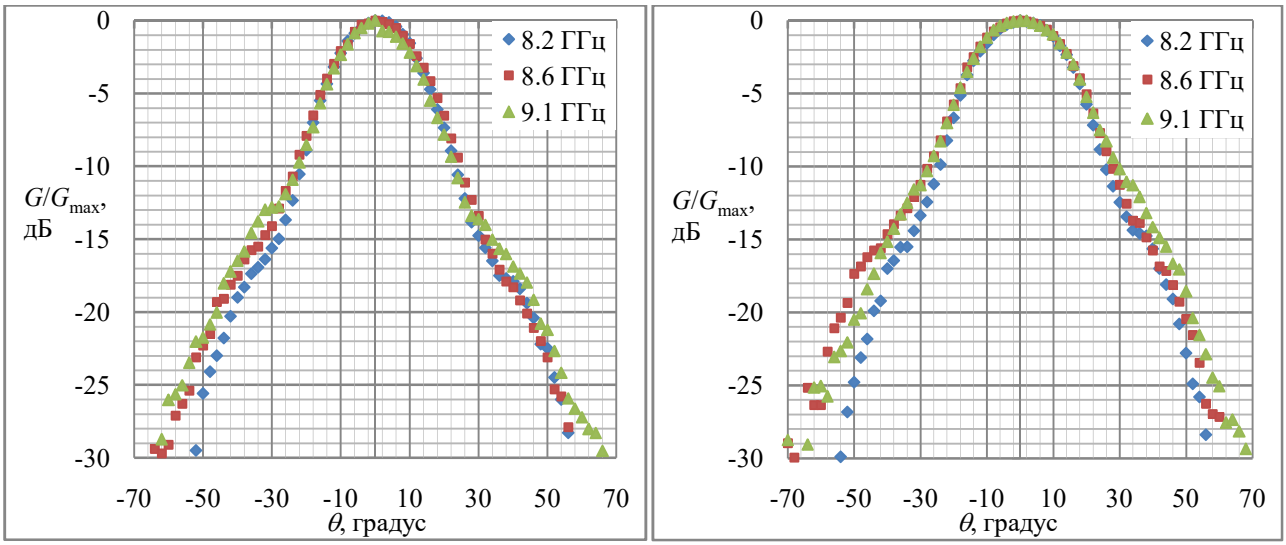


Рисунок 2.8. Измеренные диаграммы направленности. Для LCP — слева; для RCP — справа.

Осевой коэффициент эллиптичности определяется разделителем поляризаций, находящимся внутри БПК и также зависит от качества изготовления облучателя и волноводного тракта. Для измерения осевого коэффициента эллиптичности в измерительный стенд (рисунок 2.7) был добавлен волноводный СВЧ-тракт между БПК и рупором. Измерения проводились методом вращающейся передающей антенны, расположенной на оси входного тракта приемной системы в дальней зоне для данного рупора. Измерения показали, что осевой коэффициент эллиптичности $K_э$ входных СВЧ-цепей разработанной приемной системы радиотелескопа РТ-4 во всем рабочем диапазоне частот не превышает 1 дБ. По измеренному коэффициенту осевой эллиптичности можно определить уровень кросс-поляризационной составляющей из следующего соотношения:

$$\frac{A_{\text{осн}} + A_{\text{кросс}}}{A_{\text{осн}} - A_{\text{кросс}}} = 10^{\frac{K_э}{20}}, \tag{2.4}$$

где $A_{\text{осн}}$ и $A_{\text{кросс}}$ — амплитуды сигнала основной и кроссполяризационной составляющей, $K_э$ — коэффициент осевой эллиптичности. Следовательно,

уровень кросс-поляризационной составляющей по отношению к основной в данном случае будет минус 25 дБ. Результаты измерений на частотах 8.2, 8.6 и 9.1 ГГц приведены на рисунке 2.9.

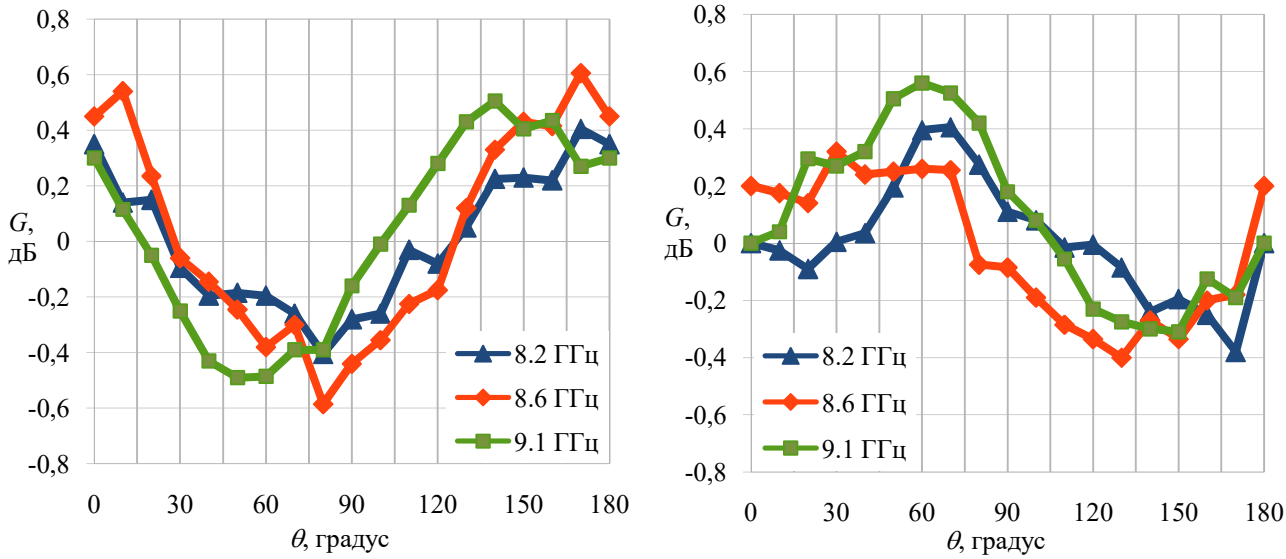


Рисунок 2.9. Измеренный коэффициент эллиптичности. Для LCP— слева; для RCP—справа.

Таким образом, ширина ДН разработанного облучателя по уровню минус 10 дБ составляет 51–54°, при оптимальном расчетном значении 50°. Осевой коэффициент эллиптичности $K_э$ входного СВЧ-тракта разработанной приемной системы во всем рабочем диапазоне частот не превышает 1 дБ. Ослабление L в входном волноводном СВЧ-тракте в рабочем диапазоне частот (8.2–9.1 ГГц) составляет 0.16 дБ. Данные характеристики скалярного рупора и волноводного СВЧ-тракта позволяют их использовать в составе приемной системы X-диапазона частот для радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции.

2.3 Блок приемный криостатируемый

Для удобства дальнейшего анализа разработанной приемной системы введем следующие параметры:

– $T_{пс}$ — шумовая температура приемной системы радиотелескопа РТ-4, пересчитанная ко входу облучателя;

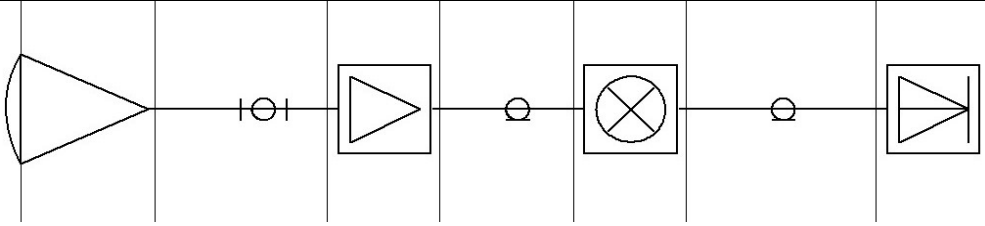
– $T_{пр}$ — шумовая температура приемника, то есть шумовая температура приемной системы без облучателя и волноводного СВЧ-тракта. Данная величина вводится для облегчения оценки параметров разработанной приемной системы;

– $T_{сис}$ — шумовая температура системы радиотелескопа РТ-4.

Для достижения поставленной цели необходимо внимательно подойти к расчету вкладов в эквивалентную шумовой температуру приемной системы, приведенную ко входу ПС (ЭШТВ), от различных узлов ПС и к разработке конструкции блока приемного криостатируемого (БПК). Фактически, собственные шумы, вносимые потери и усиление БПК будут определять шумовую температуру ПС $T_{пс}$. В таблице 2.1 приведен теоретический расчет ЭШТВ ПС, приведенный к входу облучателя.

Таблица 2.1. Теоретический расчет шумовой температуры разрабатываемой ПС.

Расчет ЭШТВ для приемной системы РТ-4								
	Вход							Выход
Элемент	Радио-Прозрачное окно	Рупор	Волноводный тракт	БПК	Стальной кабель	БПЧ	Гибкий кабель в кабельной петле	СПШС
Потери/усиление, дБ	-0.05	-0.05	-0.16	28.0	-0.15	34.0	-1,0	-0.2
Температура физическая, К	293	293	293	30	293	293	293	293
Шумовая температура (Тш), К	3.39	3.39	11.00	14.85	10.30	450,00	75,78	470,00
Вклад в общую Тш, К	3.39	3.43	11.25	15.93	0.02	0.78	0.0001	0.04
Общая Тш, К	34.94							
Общее усиление, дБ	60.4							



Исходя из таблицы 2.1 для разработанной облучающей системы — скалярного рупора и волноводного тракта, чтобы достичь требуемой шумовой температуры системы вклад БПК в ЭШТВ не должен превышать — 15 К. Вклад

последующих блоков будет незначителен при условии, что коэффициент усиления БПК будет порядка 30 дБ.

На БПК возлагаются следующие функции: разделение поляризаций принимаемого сигнала, последующие усиление принятого сигнала в двух поляризациях (RCP и LCP) и ввод сигналов амплитудной и фазовой калибровки в СВЧ-тракт на входе БПК. Вход БПК для стыковки с СВЧ-трактом должен быть выполнен в виде круглого волновода диаметром 25 мм. Ввод сигналов амплитудной калибровки в волноводный тракт осуществляется через направленный ответвитель, расположенный непосредственно на входном волноводе БПК рисунок 2.10.

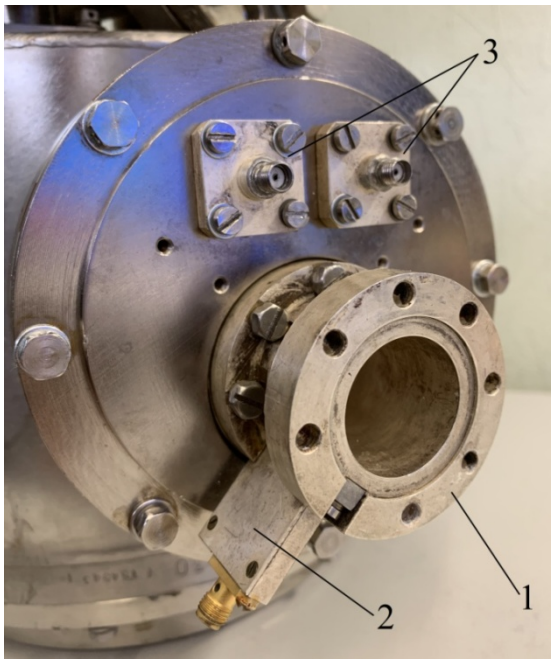


Рисунок 2.10. Интерфейсный фланец БПК. 1 — входной волновод круглого сечения диаметром 25 мм; 2— направленный ответвитель с коаксиальным входом; 3 — коаксиальный выходы БПК, соответствующие двум разным поляризациям.

В целях снижения вклада в ЭШТВ потерь в разделителе поляризации и МШУ они помещены в блок приемный криостатируемый (БПК), где охлаждаются до криогенных температур. БПК представляет собой криостат, полость которого вакуумируется, криогенное охлаждение обеспечивается микрокриогенной системой (МКС) замкнутого цикла Джиффорда-МакМагона. Конструкция БПК показана на рисунок 2.11. После направленного ответвителя в БПК на пути следования

СВЧ-сигнала находится волноводный разделитель поляризаций (РП). С целью уменьшения теплопритоков от интерфейсного фланца РП выполнен из нескольких частей. Входная часть РП представляет собой стальной теплоразвязывающий волновод (1), отбор тепла, от которого производится на первую ступень микроохладителя (2) с помощью гибких хладоводов (3). Немаловажным параметром разделителя поляризаций являются вносимые потери, так как РП располагается перед МШУ, то согласно формуле Фрииса (1.2) — потери в разделителе будут давать значительный вклад в шумовую температуру БПК. РП (4) нагружен на вторую ступень микроохладителя (5), непосредственно к волноводным выходам разделителя поляризаций подключены СВЧ-вентили (6). Сигналы правой и левой круговых поляризаций (RCP и LCP) после вентилей попадают на два охлаждаемых малошумящих усилителя (МШУ) (7). Отвод тепла от МШУ, вентилей и РП на вторую ступень микроохладителя для уменьшения влияния вибраций осуществляется с помощью гибких медных хладоводов (8). Усиленный выходной сигнал подается на интерфейсный фланец посредством стальных теплоразвязывающих коаксиальных кабелей (9). Для снижения нагрева тепловым излучением охлаждаемых элементов БПК, внутри корпуса криостата установлен радиационный (тепловой) экран (10), который отводит энергию теплового излучения на первую ступень микроохладителя (2). На рисунке 2.11 тепловой экран показан без крышки. Для достижения более глубокой степени вакуума в процессе охлаждения в полости криостата на первой ступени микроохладителя размещен адсорбционный насос (11). На корпусе криостата установлен ручной вакуумный вентиль, оканчивающийся штуцером для подключения вакуумного насоса при вакуумировании БПК.

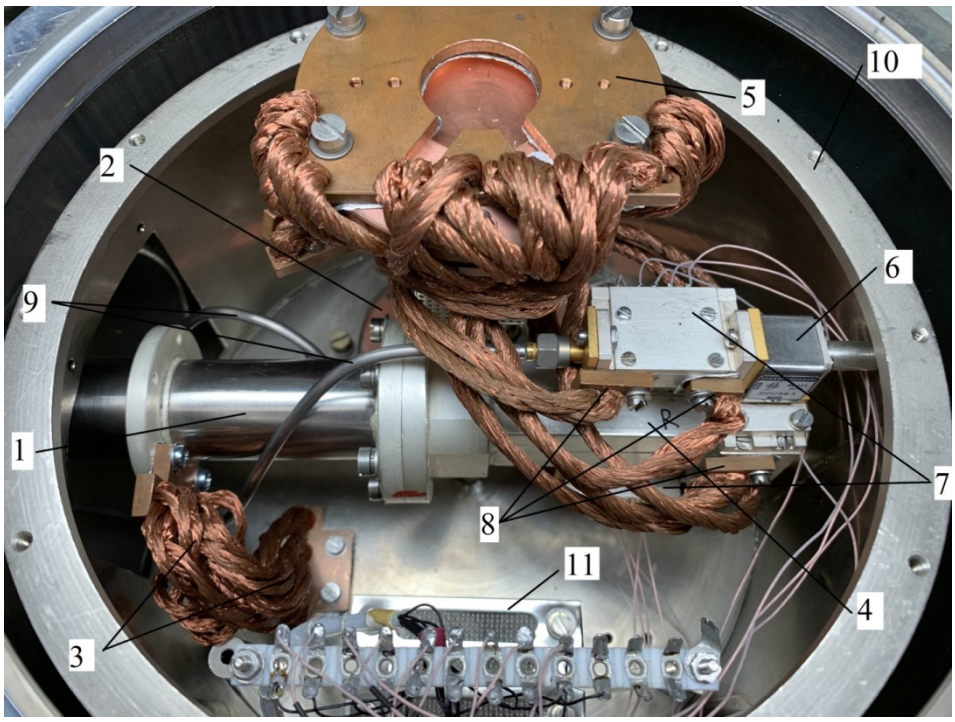


Рисунок 2.11. Блок приемный криостатируемый (без крышек криостата и теплового экрана).

При разработке конструкции БПК основной упор был сделан на обеспечение минимальной физической температуры основных элементов, что, в конечном счете, положительно сказалось на шумовой температуре БПК. Графики измерения температуры основных элементов БПК, полученные в процессе выхода на криогенных режим, представлены на рисунке 2.12.

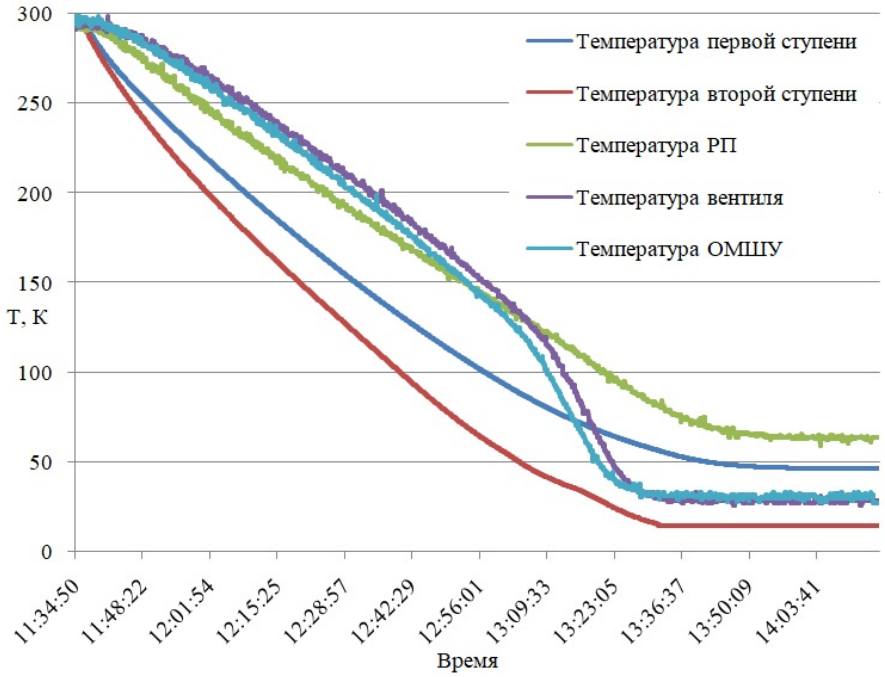
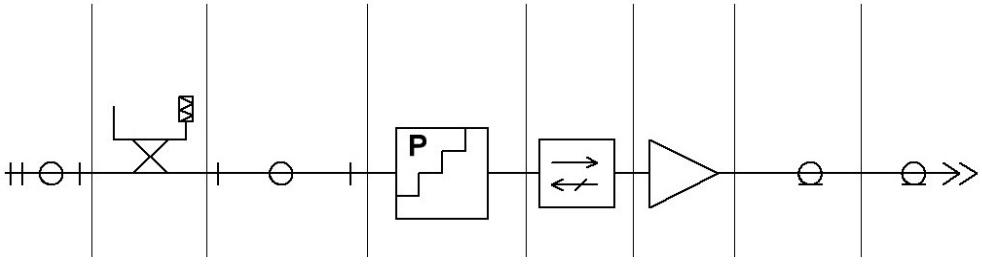


Рисунок 2.12. Графики выхода на криогенный режим БПК.

Из рисунка 2.12 видно, что разработанный БПК выходит на криогенный режим за 2 часа 20 минут — это соответствует стабилизации температуры на ступенях микроохладителя и основных узлах БПК. Температура на второй ступени микроохладителя достигает значения 15 К, а температура первой ступени — 47 К. При этом удается достигнуть следующих значений физической температуры для основных узлов БПК: 60 К — температура разделителя поляризаций, 30 К — температура вентиля и МШУ. Температура на основных узлах несколько выше, нежели на ступенях микроохладителя. Это связано с остаточными теплопритоками от интерфейсного фланца БПК по СВЧ-кабелям и особенностью конструкции разделителя поляризаций, не позволяющей его полностью развязать от интерфейсного фланца. Конструкция БПК обеспечивает отвод тепла от основных узлов на вторую ступень микроохладителя только посредством гибких хладоводов, что также увеличивает конечную температуру. Тем не менее, полученные значения физической температуры основных узлов БПК, использованные в расчете ЭШТВ в таблице 2.2 позволяют говорить о возможности достижения шумовой температуры БПК порядка 15 К.

Таблица 2.2. Теоретический расчет шумовой температуры разработанного БПК.

Расчет ЭШТВ для БПК								
	Вход							Выход
Элемент	Волноводный гермоввод БПК	НО	Теплоразвязывающий волновод РП	Разделитель поляризаций	Вентиль	МШУ	Стальной СВЧ-кабель	Выходной гермоввод
Потери/усиление, дБ	-0.05	-0.05	-0.1	-0.05	-0.05	30	-0.5	-0.2
Температура физическая, К	293	293	60	60	30	30	90	293
Шумовая температура (Тш), К	3.39	0.03	1.40	0.69	0.35	8.00	10.98	14.14
Вклад в общую Тш, К	3.39	0.03+0,3	1.43	0.73	0.37	8.57	0.01	0.02
Общая Тш, К	14.85							
Общее усиление, дБ	29.00							



Конструкция БПК позволяет измерить его коэффициент усиления через встроенный направленный ответвитель, поэтому в данной главе будут приведены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазочастотная характеристика (ФЧХ) БПК с учетом характеристики переходного ослабления направленного ответвителя БПК, измеренной в лаборатории. Методики измерения данных характеристик описаны в работах [51, 52]. АЧХ и ФЧХ БПК на криогенном режиме представлены на рисунках 2.13–2.15. Измерения АЧХ и ФЧХ проводилось с помощью векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA40. Коэффициент усиления БПК G в рабочем диапазоне частот в канале RCP составил 28.2±1.3 дБ, в канале LCP G=28.0±0.8 дБ.

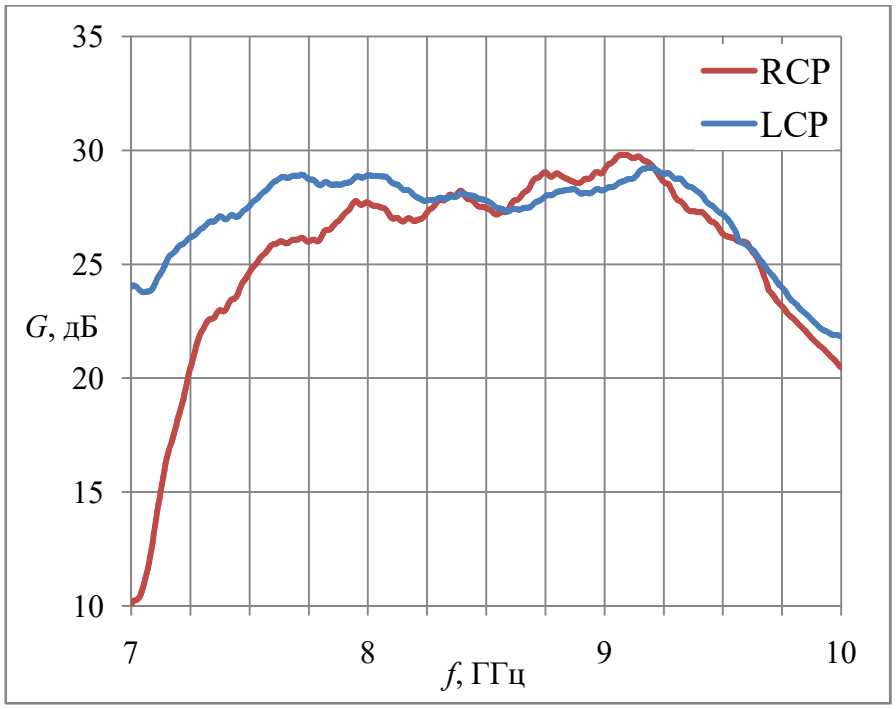


Рисунок 2.13. Амплитудно-частотная характеристика БПК.

На рисунках 2.14–2.15 представлены результаты измерений ФЧХ в полосе 8.0–9.5 ГГц. Определено отклонение фазовой характеристики от линейной (среднеквадратическое значение σ_φ); σ_φ=5.3° для канала RCP и σ_φ=3.9° для канала LCP. Используя данные работы [23, таблицу 7.1 стр. 222] можно оценить ухудшение отношения сигнал-шум из-за отклонения ФЧХ от линейной. Оно не превышает 1.5% в полосе 8.2–9.1 ГГц, что практически не оказывает влияния на результат корреляционной обработки.

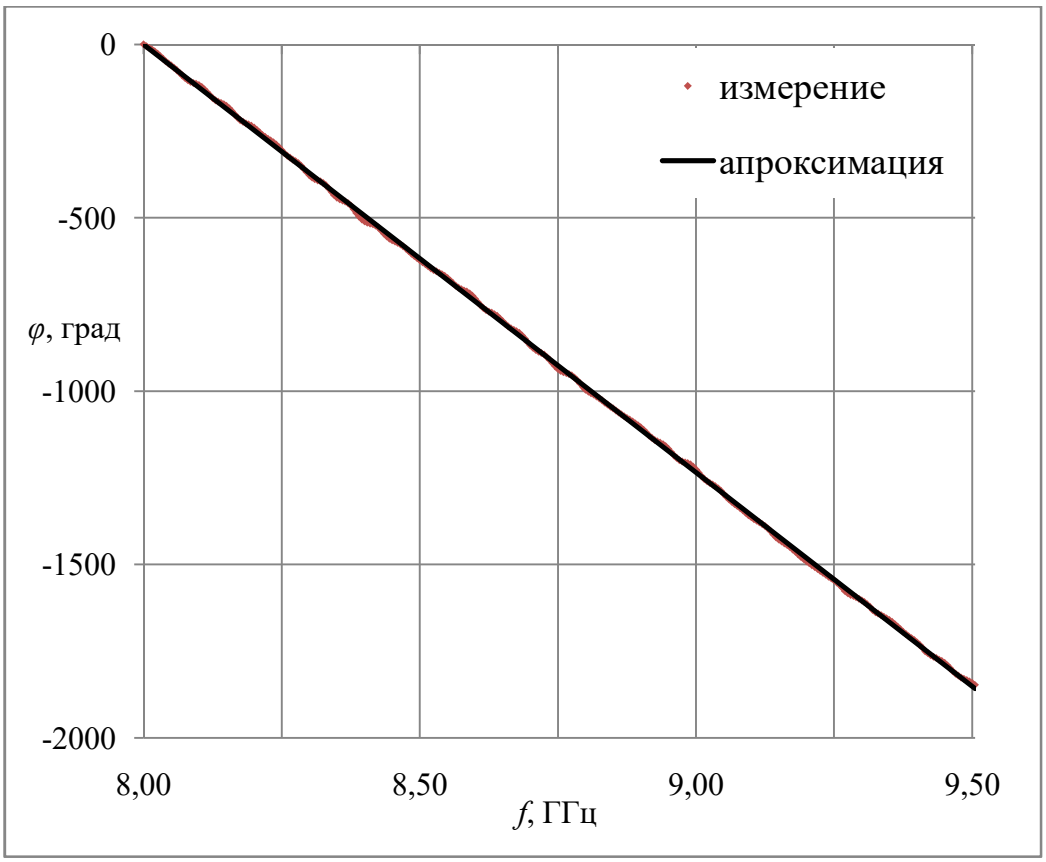


Рисунок 2.14. Фазочастотная характеристика RCP канал БПК

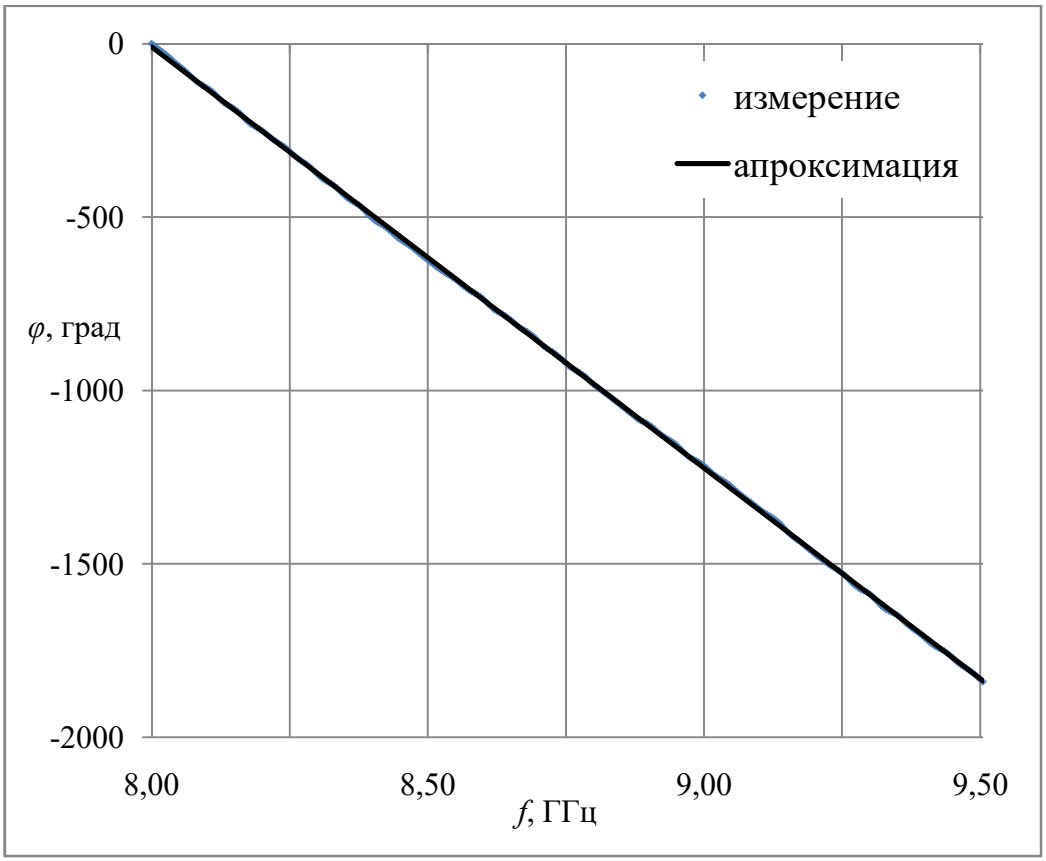


Рисунок 2.15. Фазочастотная характеристика LCP канал БПК

Измерения шумовой температуры БПК необходимо проводить с использованием специального низкотемпературного генератора шума при этом для увеличения уровня регистрируемого сигнала и, следовательно, отношения сигнал-шум необходимо использовать дополнительный усилительный каскад. Поэтому целесообразно проводить данные измерения БПК в составе созданной приемной системы. Результаты и методики измерений будут рассмотрены в следующей главе.

Измеренные рабочие характеристики блока приемного криостатируемого (БПК) соответствуют запланированным. А именно:

– БПК осуществляет поляризационное разделение принимаемого сигнала (RCP и LCP) при этом уровень кросс-поляризационной составляющей не более минус 25 дБ.

– Использование криогенного охлаждения БПК позволило достигнуть уровня собственных шумов БПК не более 15 К, при этом коэффициент усиления G=28±1 дБ в рабочем диапазоне частот, что позволяет рассчитывать на достижение шумовой температуры разработанной приемной системы порядка 30–35 К.

– Среднеквадратичное отклонение ФЧХ БПК от линейной не превышает σ_{φ}=6°. Это приведет к ухудшению отношения сигнал-шум менее 1.5% в полосе 8.2–9.1 ГГц, что практически не влияет на результат корреляционной обработки.

2.4 Блок преобразования частоты

Блок преобразования частоты должен обеспечивать окончательное усиление принимаемого сигнала, фильтрацию и преобразование СВЧ-сигнала в область промежуточных частот, подходящую для системы регистрации. В данном случае при разработке приемной системы немаловажным фактором является требование совместимости с существующими системами регистрации и частотно-временной синхронизации. Для того чтобы определиться с выходным диапазоном частот и коэффициентом усиления БПЧ, а соответственно и приемной системы, необходимо сделать выбор системы регистрации для передвижной РСДБ-станции.

В качестве системы регистрации для радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции была выбрана цифровая система преобразования широкополосных

сигналов (СПШС), которая состоит из двух одинаковых модулей, каждый из которых содержит по два канала цифрового преобразования сигналов, подключаемых к выходам промежуточных частот радиоастрономической приемной системы (рисунок. 2.16).

Рисунок 2.16. Модули системы преобразования широкополосных сигналов.

СПШС предназначена для усиления, фильтрации и двухбитного квантования принимаемых шумовых сигналов в заданных полосах частот с формированием на выходе цифровых информационных потоков в формате VDIF (VLBI Data Interchange Format) [53]. Подробно устройство и принцип работы каналов цифрового преобразования сигналов описано в работе [45]. Основные параметры СПШС приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Основные параметры СПШС.

Параметр	Значение
Число каналов	4
Полоса пропускания канала, МГц	512
Диапазон входных частот, МГц	0–1024
Тактовая частота считывания выборок сигнала, МГц	1024
Вид квантования, бит	2
Суммарная скорость потока данных на выходе каждого канала, Гбит/с	2.048
Суммарная скорость потока данных на выходе системы, Гбит/с	8.192
Формат данных на выходе системы	VDIF
Тип интерфейса на выходе	10 Gigabit Ethernet (10GE)
Интерфейс управления	10/100 Ethernet

Сигналы внешней синхронизации	5/10/100 МГц, 1 Гц (1 PPS)
Уровень входного сигнала, дБм	-6–0
Автоматическая регулировка усиления, дБ	0–31

Таким образом, выходной диапазон частот БПЧ должен лежать в пределах 0–1024 МГц, а выходной уровень мощности в пределе -6–0 дБм. Для уменьшения потерь принимаемого сигнала целесообразно размещать БПЧ в непосредственной близости от БПК, то есть в подзеркальном пространстве радиотелескопа, а СПШС размещать в антенном контейнере. В таком случае коэффициент усиления БПЧ должен быть не менее 30 дБ, чтобы удовлетворить требованиям СПШС с учетом потерь в кабельных петлях между приемной системой и системой регистрации. Кроме того необходимо обеспечить разделение сигнала на два канала 0–512 МГц и 512–1024 МГц для обеспечения возможности работы в полосе 1 ГГц СПШС.

Под заявленные характеристики подходит блок преобразования частот (БПЧ), разработанный автором ранее (в рамках магистерской диссертации), для *S/X* радиоастрономической приемной системы радиотелескопа РТ-70 (Уссурийск) [54, 55]. *S/X* БПЧ (рисунок 2.17) осуществляет окончательное усиление и преобразование СВЧ-сигнала (в *X*-диапазоне 8.18–9.08 ГГц; в *S*-диапазоне 2.15–2.5 ГГц) в область промежуточных частот, а также амплитудную модуляцию входного сигнала при работе приемного канала в режиме радиометра с пилот-сигналом. В блоке производится преобразование частоты СВЧ-сигнала к промежуточной частоте (100…1000) МГц для приемных каналов диапазона 3,5 см и (130…480) МГц для приемных каналов диапазона 13 см, а также подавляются сигналы вне полосы приема. В целом характеристики *X*-канала данных S/X БПЧ [56, 57] соответствуют требованиям, описанным ранее для приемной системы передвижной РСДБ-станции. Данные БПЧ совместимы по своим параметрам с существующими приемными системами комплекса «Квазар-КВО».

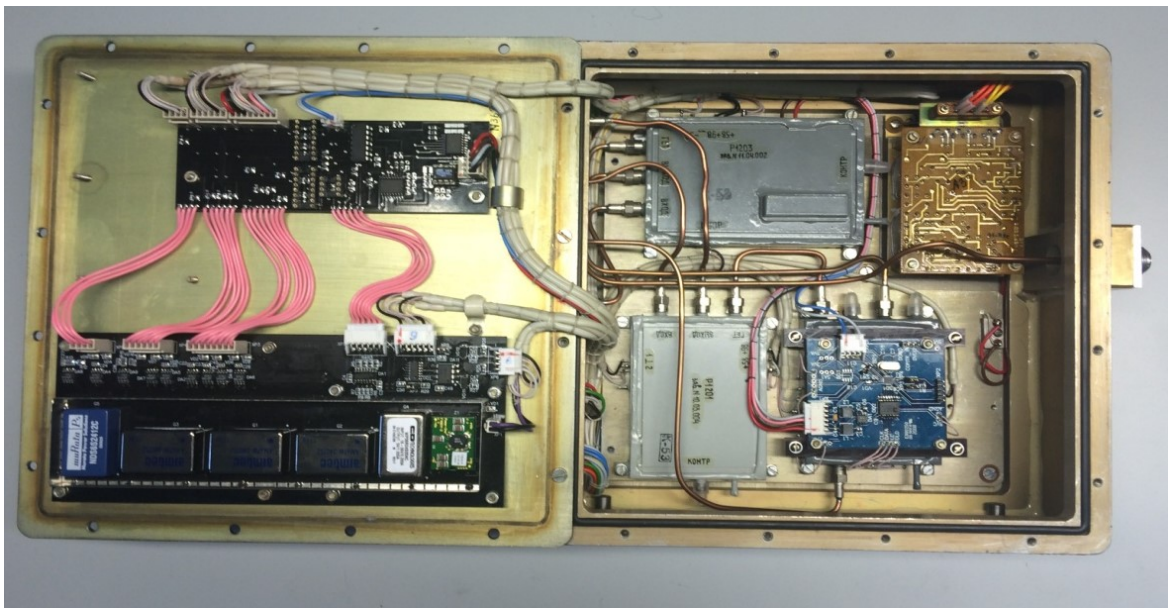


Рисунок 2.17. S/X БПЧ радиоастрономической приемной системы РТ-70.

Поэтому за основу БПЧ разрабатываемой приемной системы для передвижной РДСБ-станции было принято решение взять ранее разработанные *S/X* БПЧ, что позволило значительно сократить время на разработку, моделирование и конструирование блоков, а так же снять вопросы о совместимости и унификации оборудования. Моделирование размещения приемной системы в подзеркальном пространстве радиотелескопа и незначительные массогабаритные характеристики ШПК *S*-диапазона позволили принять решение сохранить в *S/X* БПЧ ШПК *S*-диапазона, но отключить его питание и управление. При этом в случае необходимости данные БПЧ могут быть использованы в *S/X* приемных системах комплекса «Квазар-КВО», так как сохранена унификация. Кроме того была упразднена амплитудная модуляция, так как режим работы с пилот-сигналом для разрабатываемой приемной системы не нужен. Отключение *S*-каналов в обоих БПЧ позволяет уменьшить количество блоков питания.

Система управления и электропитания ПС РТ-4 базируется на аналогичной системе для S/X приемника РТ-70. Она была существенно модернизирована. Уменьшено количество блоков питания до двух блоков питания номиналом 24 В: один отвечает за питание систем термостабилизации, второй за питание приемной системы. Модернизировано управление приемником, позволяющее обеспечить управление обоими БПЧ с использованием одного блока связи против двух в раз-

работанной ранее приемной системе для РТ-70, что является весьма критичным при условии ограниченного пространства передвижной РСДБ-станции. Более того для обеспечения межблочного обмена данными и нормального функционирования приемной системы теперь достаточно одного блока генераторов шума (БГШ) против двух в приемной системе для РТ-70. Функции управления включают: покаскадное и поканальное включение узлов приемной системы, изменение значения аттенюатора калибровки, контроль температуры внутри блоков приемной системы и в подзеркальном пространстве, контроль потребляемых токов МШУ. Управления всеми функциями блока и контроль режимов работы осуществляется посредством технологии Ethernet.

На рисунке 2.18 представлена функциональная схема БПЧ. Во входном тракте БПЧ СВЧ-сигнал поступает в широкополосный преобразовательный канал (ШПК), разработанный в ИПА РАН [28]. Узел ШПК включает: несколько каскадов усилителей (УВЧ, УПЧ), полосно-пропускающие фильтры, смеситель и другие узлы, обеспечивающие преобразование входного сигнала в сигнал промежуточной частоты. В качестве гетеродина в данном БПЧ используется совмещенный S/X гетеродин (2.02/8.08 ГГц), однако гетеродин в S-диапазоне отключен.

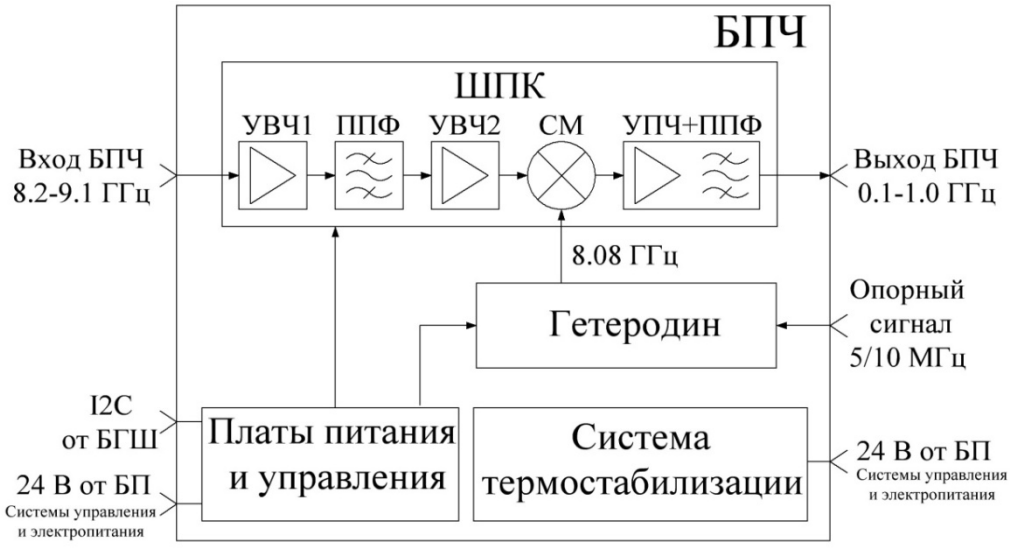


Рисунок 2.18. Функциональная схема БПЧ.

Как известно, проблема когерентности в РСДБ приемных системах решается привязкой частотных преобразований к источнику опорной частоты. В данном случае источником опорного синхронизирующего сигнала может быть сигнал 5 МГц либо 10 МГц, что совместимо с выбранной системой регистрации. Питание гетеродина и микросборки ШПК осуществляется платой вторичных источников питания, которая располагает на крышке БПЧ и обеспечивает выработку необходимых номиналов напряжений (+9 В, ±5 В, +3 В из 24 В поступающих от БП системы управления и электропитания). Управление режимами работы и контроль параметров БПЧ осуществляется по I^2C шине.

Так как БПЧ будут установлены в подзеркальном пространстве радиотелескопа РТ-4 (то есть на улице) к системе термостабилизации предъявляются более жесткие требования. Данные БПЧ термостатируется с помощью пяти последовательно соединенных термобатарей, работа которых основана на эффекте Пельтье. Система термостабилизации была проверена в термокамере изменение температуры на основных элементах не превышает 1°С при изменении внешней температуры в диапазоне от минус 20 до 30°С. Все БПЧ выполнены в герметичных корпусах входные и выходные СВЧ-разъемы и разъемы питания и управления выполнены в виде гермовводов и электрически развязаны с корпусом.

К основным рабочим характеристикам БПЧ относятся зависимость коэффициента усиления (по мощности) G и коэффициента шума (шумовой температуры T) от частоты f. Схема для измерения коэффициента шума и коэффициента передачи БПЧ представлена на рисунке 2.19. Основными элементами этой схемы являются анализатор сигналов N9030A и источник шума N4002A фирмы Agilent. Для работы БПЧ используется высокостабильный сигнал опорной частоты 5 МГц от водородного стандарта частоты VCH-1003M. Измерения характеристик БПЧ проводились методом Y-фактора [58].

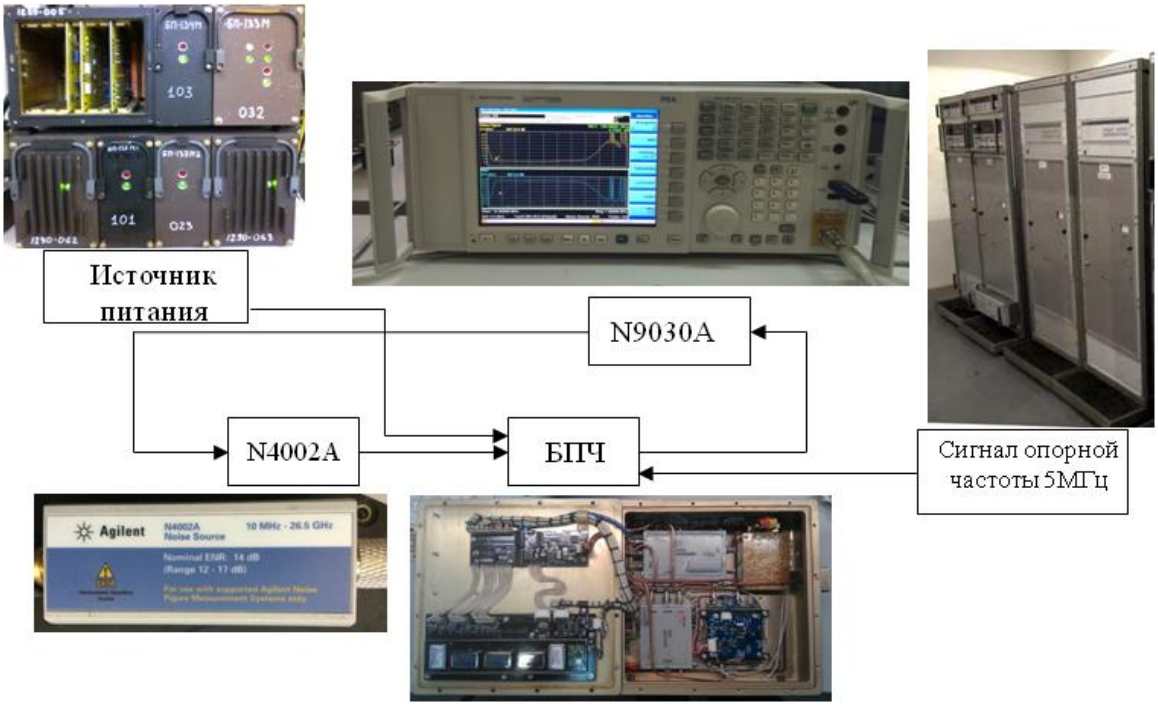


Рисунок 2.19. Схема измерения параметров БПЧ.

На рисунках 2.20 и 2.21 приведены экспериментальные зависимости коэффициента усиления G и шумовой температуры T от частоты соответственно для RCP и LCP БПЧ. Средняя величина коэффициента усиления в рабочем диапазоне частот RCP БПЧ составила 34.5 дБ, неравномерность не превышала 2 дБ. Шумовая температура этого БПЧ не превышала 450 К.

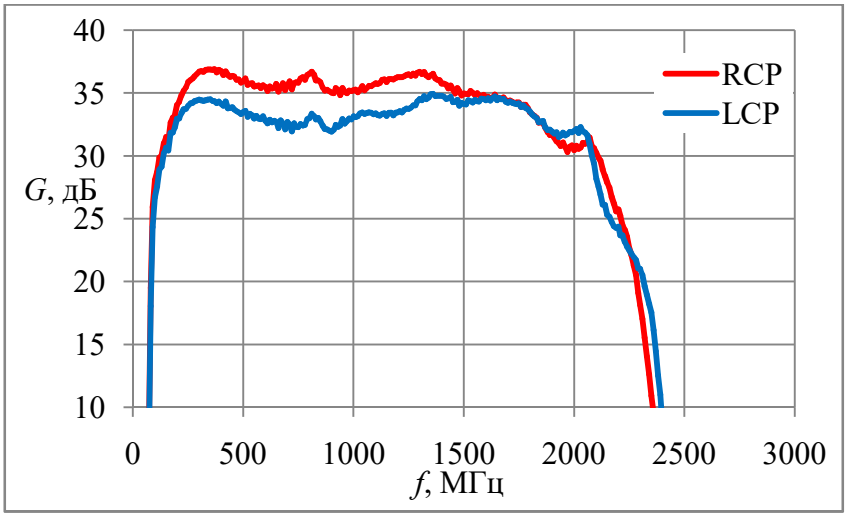


Рисунок 2.20. Зависимость коэффициента усиления БПЧ от частоты.

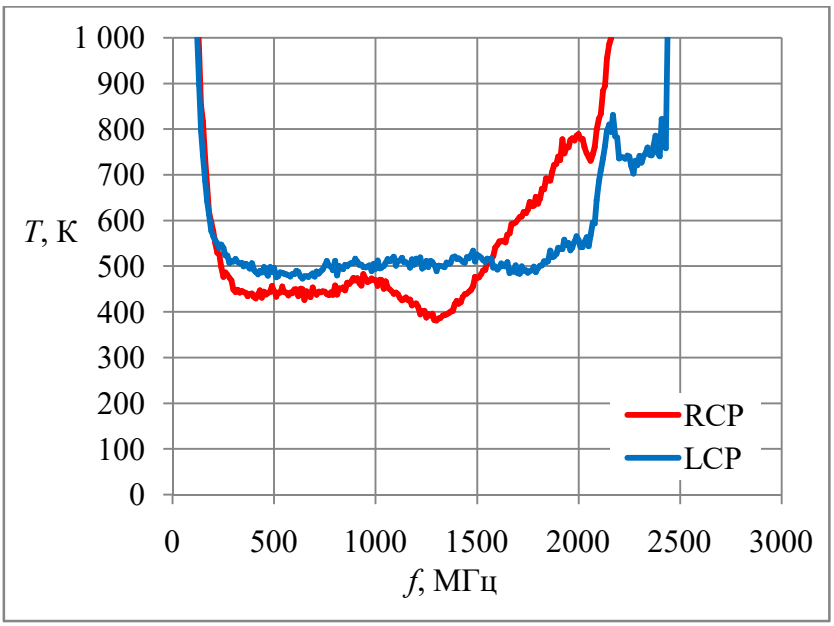


Рисунок 2.21. Зависимость шумовой температуры БПЧ от частоты.

Для LCP БПЧ средняя величина коэффициента усиления G составила 32.5 дБ, неравномерность также не превышала 2 дБ. Шумовая температура этого БПЧ не превышала 500 К.

Измеренная зависимость коэффициента усиления от частоты позволяет вычислить потенциально достижимую радиометрическую полосу приемника $\Delta f_{РАД} = \left(\int_0^\infty G(f)df \right)^2 \cdot \left(\int_0^\infty G^2(f)df \right)^{-1}$, которая составила 930 МГц. С учетом данных в таблице 2.1 вклад БПЧ в шумовую температуру приемной системы $T_{пс}$ составляет не более 1 К.

Характеристики созданных БПЧ позволяют использовать их в составе приемной системы передвижной РСДБ-станции совместно с системой регистрации СПШС в РСДБ-наблюдениях с комплексом «Квазар-КВО».

2.5 Блок генераторов шума

В сформулированных ранее требованиях к разрабатываемой приемной системе была поставлена задача амплитудной и фазовой калибровки приемного тракта. Это позволит проводить измерения параметров приемной системы и радиотелескопа непосредственно до или даже во время наблюдений. В то же время, фазо-

вая калибровка позволяет проверить и в случае необходимости учесть фазовую нестабильность приемного тракта в РСДБ-наблюдениях.

В разрабатываемой приемной системе функцию формирования амплитудной калибровки выполняет блок генераторов шума (БГШ). Сигнал фазовой калибровки формируется генератором пикосекундных импульсов (ГПИ) и поступает в БГШ. От него по СВЧ-тракту через направленный ответвитель калибровки вводятся в приемный тракт перед входом БПК.

Для радиоастрономической приемной системы РТ-70 в рамках магистерской диссертации был разработан *S/X* БГШ (рисунок 2.22) [54]. По своим характеристикам он совместим с соответствующими блоками приемных систем РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» [29] и может быть использован в качестве основы для БГШ в разрабатываемой приемной системе передвижной РСДБ-станции. Но с учетом требований к массе приемной аппаратуры и специфики расположения БГШ необходима доработка системы термостабилизации, отключение и демонтаж лишних элементов внутри блока. Таким образом, изготовленный БГШ способен формировать сигналы амплитудной калибровки (~10–20 К) в *X*-диапазоне, сигналы фазовой калибровки от ГПИ вводятся в тракт БГШ с помощью направленного ответвителя.

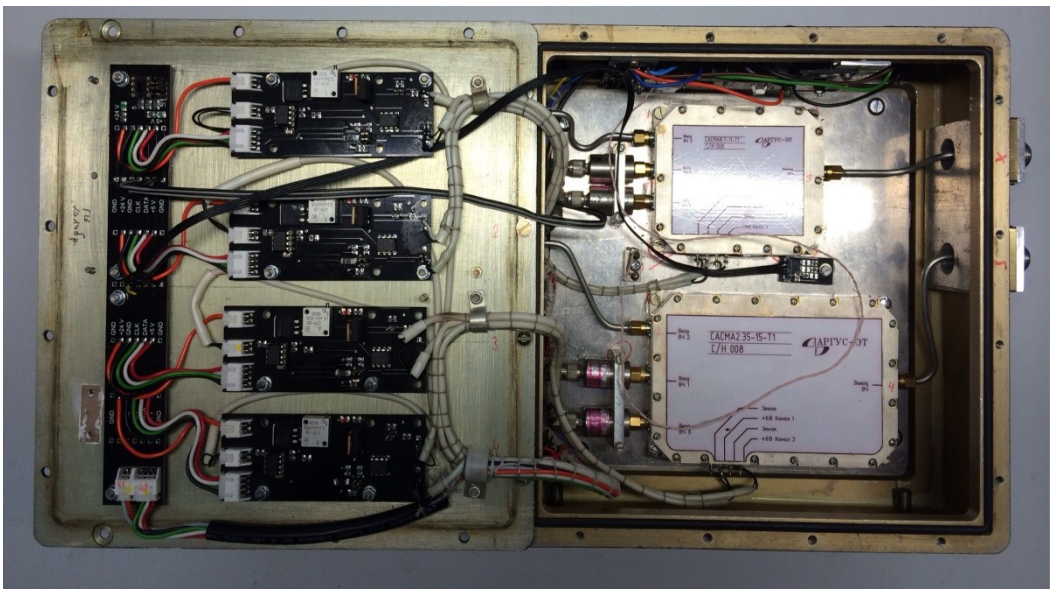


Рисунок 2.22. S/X БГШ радиоастрономической приемной системы РТ-70.

Функциональная схема БГШ представлена на рисунке 2.23. Источником сигнала калибровки в канале ГШ является малогабаритный широкополосный полупроводниковый генератор шума на лавинно-пролетном диоде (ЛПД) с коаксиальным выходом. Для обеспечения долговременной стабильности спектральной плотности мощности шума все СВЧ-элементы и источники опорных напряжений плат питания термостатируются. Массивная микросборка формирования шумового сигнала (МФШС) способствует стабилизации теплового режима наиболее термочувствительных элементов — p-i-n аттенюаторов. Для блока генераторов шума применена специальная малогабаритная система термостабилизации, обеспечивающая тепловой режим с точностью ±0.1°С в месте установки датчика. СВЧ-разъемы блока изолированы от корпуса, низкочастотные соединения развязаны оптронами.

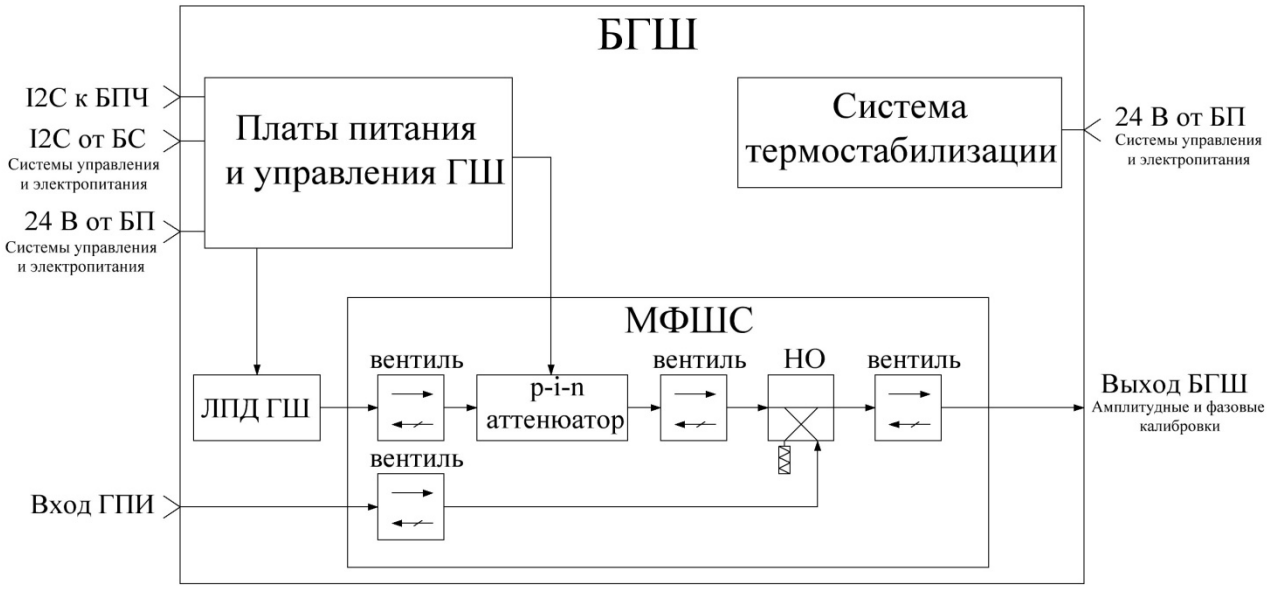


Рисунок 2.23. Функциональная схема БГШ.

Основной характеристикой БГШ является зависимость спектральной плотности мощности шума (СПМШ) сигнала калибровки $T_{кал}(f)$, выраженная в единицах шумовой температуры, от частоты f. Схема для измерения СПМШ БГШ представлена на рисунке 2.24. Основными элементами этой схемы являются измеритель шума N8975A, направленный ответвитель 87300C и источник шума N4002A фирмы Agilent. Методика измерения спектральной плотности мощности шума

БГШ основана на методе Y-фактора изложенном в [58], только в данном измерении сигнал от БГШ смешивается с сигналом от прецизионного источника шума через направленный ответвитель.

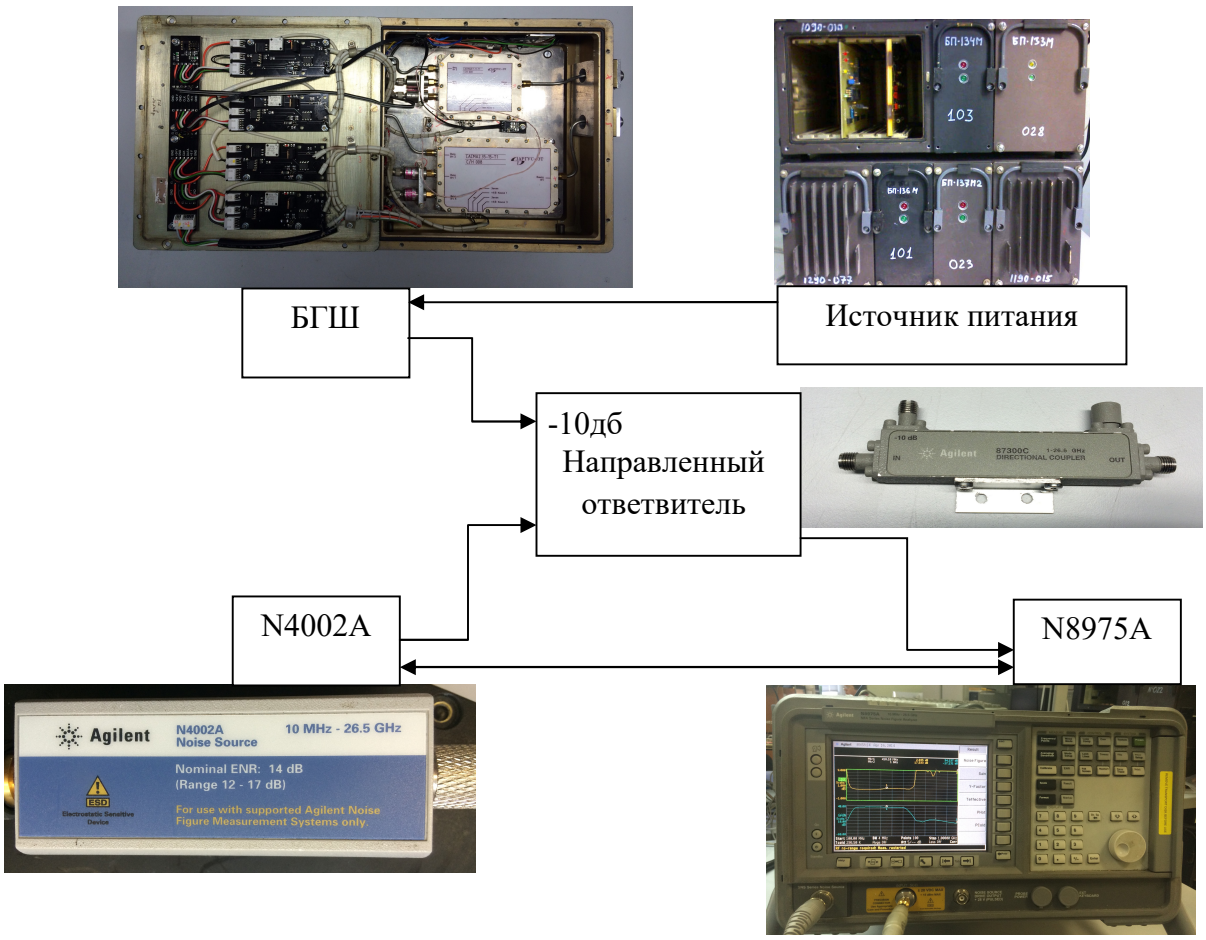


Рисунок 2.24. Схема измерения параметров БГШ.

На рисунке 2.25 приведены экспериментальные зависимости сигнала калибровки $T_{кал}(f)$ от частоты при минимальном и максимальном значении аттенюатора. Величина $T_{кал}$=120000 К при минимальном аттенюаторе и $T_{кал}$=8000 К при максимально закрытом аттенюаторе калибровки. Проведенные измерения показывают, что с учетом переходного ослабления направленного ответвителя перед БПК (30 дБ), уровень сигнала амплитудной калибровки будет 8–120 К в рабочем диапазоне частот. Таким образом, данный БГШ может быть использован в составе разрабатываемой приемной системы *X*-дипазона частот для передвижной РСДБ-станции.

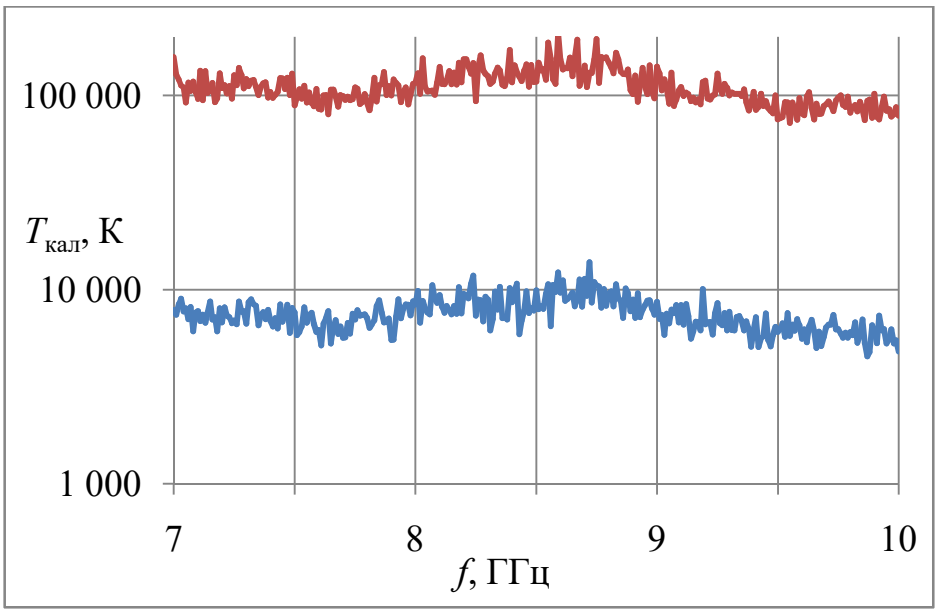


Рисунок 2.25. СПМШ калибровки БГШ при минимальном и максимальном значении аттенюатора калибровки.

2.6 Размещение приемной системы на радиотелескопе РТ-4

Прототип передвижной РСДБ-станции включает антенную систему радиотелескопа РТ-4 и антенный контейнер. Антенный контейнер распложен в непосредственной близости от радиотелескопа. При размещении приемной системы на радиотелескопе РТ-4 необходимо учитывать следующие факторы:

– Облучатель разработанной приемной системы размещается во вторичном фокусе антенной системы РТ-4, при этом принимаемый сигнал поступает в блок приемный криостатируемый (БПК) по волноводному тракту. Таким образом, для сопряжения волновода с входом БПК должна быть предусмотрена точная регулировка положения БПК в трех плоскостях и его вращение по трем осям.

– Для уменьшения потерь и улучшения стабильности принимаемого сигнала СВЧ-кабели между БПК и БПЧ должны быть выполнены жесткими и минимальной длины, то есть БПЧ необходимо разместить в подзеркальном пространстве. Для уменьшения длины кабелей амплитудной и фазовой калибровки БГШ и ГПИ также следует размещать в подзеркальном пространстве.

– Разрабатываемая конструкция для размещения аппаратуры приемной системы должна выполнять функции отвода излишком тепла от БПЧ и БГШ.

При этом блоки системы управления и электропитания приемной системы, а также аппаратуру системы частотно-временной синхронизации (СЧВС) и системы регистрации (СПШС) следует разместить в антенном контейнере. Это позволит значительно облегчить конструкцию подзеркального пространства и избежать влияния импульсных помех в работу приемной аппаратуры.

На рисунке 2.26 представлена 3D модель подзеркального пространства с размещенной в нем специально разработанной конструкцией «бабочка» (на рисунке отмечена желтым цветом). Голубым цветом отмечен кронштейн БПК, обеспечивающий необходимый диапазон регулировок БПК для совмещения его входа с волноводным трактом. Данная конструкция удовлетворяет всем требованиям, описанным выше, но предполагает демонтаж штатного кронштейна приемника НСС TESLA и части конструкции подзеркального пространства (отмечены красным). Проведенные расчеты и моделирование показали возможность использования разработанной конструкции для размещения приемной аппаратуры при этом необходимая жесткость конструкции антенной системы РТ-4 сохраниться даже с учетом демонтажа отмеченных связей.

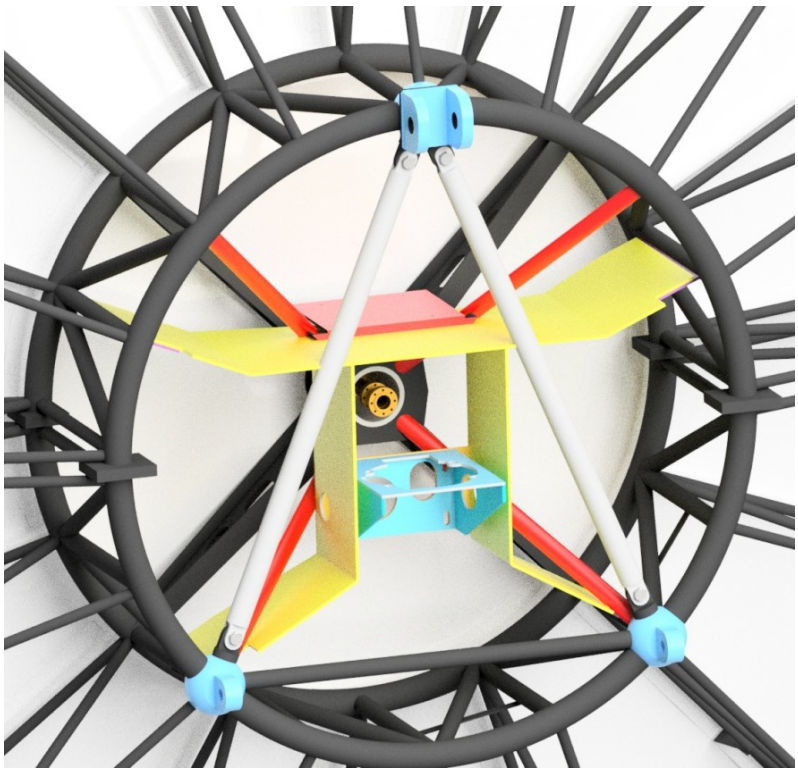


Рисунок 2.26. Модель подзеркального пространства РТ-4 с конструкцией «бабочка».

На рисунке 2.27 представлена 3D модель размещения аппаратуры приемной системы в подзеркальном пространстве. Аппаратура приемной системы размещается таким образом, что не выступает за габариты подзеркального пространства РТ-4. Кронштейн позволяет разместить БПК и при необходимости с помощью тонкой настройки точно совместить входной волноводный СВЧ-тракт с входом БПК, избежав при этом лишней нагрузки на волноводный тракт. БПЧ и БГШ размещены таким образом, чтобы длина СВЧ-кабелей от БПК до БПЧ не превышала 350 мм, от БПК до БГШ 500 мм при этом возможно использовать жесткие СВЧ-кабели. Конструкция «Бабочка» также обеспечивает отвод тепла от БПЧ и БГШ. Для уменьшения количества кабелей питания и связи в кабельной петле в подзеркальном пространстве размещается распределительная коробка (КР), обеспечивающая распределение питания и управления по потребителям. При необходимости, в подзеркальном пространстве может быть размещен генератор пикосекундных импульсов СЧВС.

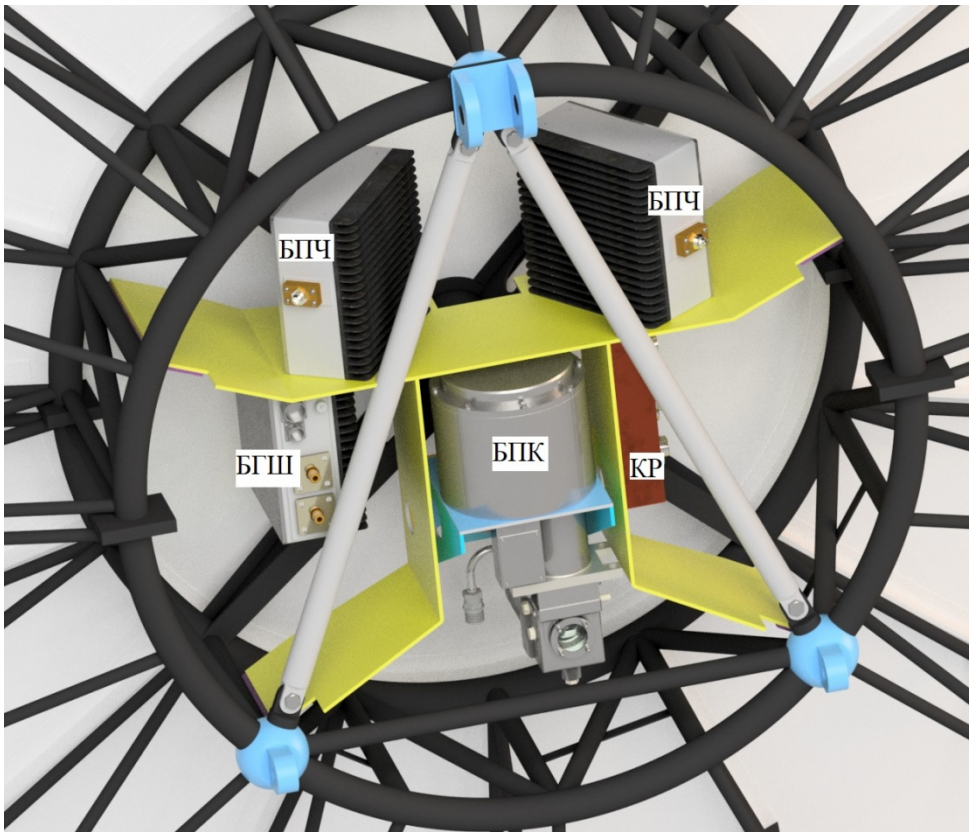


Рисунок 2.27. Модель размещения приемной системы в подзеркальном пространстве РТ-4 с конструкцией «бабочка»

Проведенное моделирование показывает, что разработанная приемная система может быть успешно размещена на радиотелескопе РТ-4. При этом разработанная конструкция «бабочка» удовлетворяет всем предъявляемым требованиям. Общая масса приемной аппаратуры вместе с конструкцией не превышает 70 кг. Таким образом, разработанная приемная система готова к монтажу на радиотелескоп РТ-4 и проведению измерений и испытаний в составе радиотелескопа. На рисунке 2.28 показана размещенная на передвижной РСДБ-станции аппаратура приемной системы вместе с вспомогательной аппаратурой: БПК — блок приемный криостатируемый; БПЧ— блоки преобразования частоты; БГШ — блок генераторов шума; КР— коробка распределительная; ИБП — источник бесперебойного питания; пускатель МО — пускатель микроохладителя и вакуумметр, относящиеся к микрокриогенной системе.

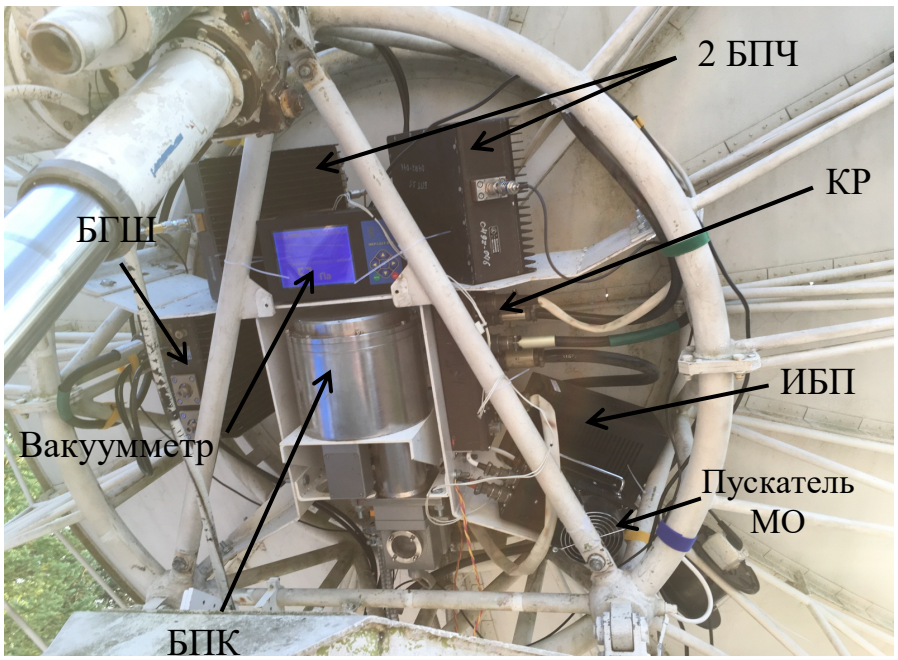


Рисунок 2.28. Приемная система размещенная на радиотелескопе РТ-4 в обсерватории «Светлое».

2.7 Выводы

1. Разработана функциональная схема приемной системы для передвижной РСДБ-станции удовлетворяющая требованиям, предъявленным к прототипу передвижной РСДБ-станции. Представлено размещение и взаимодействие

аппаратуры приемной системы, системы частотно-временной синхронизации и системы регистрации.

2. Для приемной системы радиотелескопа РТ-4 разработан облучатель (конический рупор), обеспечивающий прием сигналов от космических радиоисточников в полосе частот 8.2–9.1 ГГц. Ширина диаграммы направленности облучателя по уровню минус 10 дБ составляет 51–54°, при оптимальном расчетном значении 50°. Осевой коэффициент эллиптичности входных СВЧ-цепей разработанной приемной системы радиотелескопа РТ-4 во всем рабочем диапазоне частот не превышает 1 дБ.

3. Впервые в стране для передвижной РСДБ-станции создана высокочувствительная приемная система с криогенным охлаждением элементов, включающая блок приемный криостатируемый (БПК), блоки преобразования частоты (БПЧ) и блок генераторов шума (БГШ).

4. Определены параметры БПК, в частности значение коэффициента усиления G составляет 28 дБ, шумовая температура — 15 К, что позволяет рассчитывать на достижение шумовой температуры приемной системы — 35 К. Среднеквадратичное отклонение ФЧХ БПК от линейной не превышает σ_φ=6°, ухудшение отношения сигнал-шум из-за отклонения ФЧХ от линейной не превышает 1.5% — это практически не оказывает влияния на результат корреляционной обработки.

5. Исследованы характеристики БПЧ и БГШ данной приемной системы. Для БПЧ средняя величина коэффициента усиления G составила не менее 32 дБ, неравномерность не превышала 2 дБ в рабочей полосе частот, что может привести к ухудшению отношения сигнал-шум не более чем на 2%. Шумовая температура БПЧ не превышала 500 К, таким образом вклад БПЧ в шумовую температуру приемной системы $T_{\text{пс}}$ составляет не более 1 К. Проведенные исследования характеристик БГШ показывают, что с учетом переходного ослабления направленного ответвителя перед БПК (30 дБ), уровень сигнала амплитудной калибровки составляет 8–120 К в рабочем диапазоне частот, что является достаточным для проведения измерений на радиотелескопе РТ-4.

6. Проведено моделирование размещения блоков приемной системы на радиотелескопе РТ-4 с учетом всех факторов, влияющих на полученные характеристики.

7. Разработана специальная конструкция подвеса, позволяющая разместить аппаратуру приемной системы с сохранением ее параметров, полученных в лаборатории. Предусмотрено размещение системы управления и электропитания приемной системы, системы частотно-временной синхронизации и системы регистрации таким образом, чтобы осуществить максимально эффективную работу передвижной РСДБ-станции.

8. Особенности разработанной приемной системы не позволяют провести исследование всех характеристик блоков, поэтому в следующей главе приведены результаты исследования характеристик разработанной приемной системы в целом, что позволит сделать окончательный вывод о качестве и возможностях созданной приемной системы.

Глава 3. Основные характеристики приемной системы передвижной РСДБ-станции

Специфика исследования разработанной высокочувствительной радиоастрономической приемной системы предполагает разработку и адаптацию существующих методик измерений, позволяющих осуществить корректную оценку параметров разработанной приемной системы. Основные характеристики приемной системы можно разделить на три группы: шумовые характеристики, нелинейные характеристики и характеристики в радиоинтерферометрическом режиме. Таким образом, необходимо провести следующие исследования:

– Измерения шумовой температуры приемной системы без облучателя и волноводного тракта, а также с волноводным трактом на входе и сравнение результатов с расчетными значениями. Эти измерения позволят проверить корректность расчета вкладов ЭШТВ, реализацию блока приемного криостатируемого (БПК) и волноводного тракта. Кроме того в данных измерениях будут определены значения амплитудных калибровок, которые впоследствии позволят оценить потери вносимые волноводным трактом и облучателем на радиотелескопе. В данных исследованиях также проверяется амплитудная стабильность приемной системы.

– Исследования нелинейных характеристик позволят оценить динамический диапазон и устойчивость приемной системы к воздействию помех. Измерения точки компрессии и динамического диапазона позволят обеспечить работу приемной системы в оптимальном режиме и оценить уровни принимаемой мощности на составных частях ПС. На данный момент в *X*-диапазоне помеховая обстановка не вызывает беспокойства, однако все может измениться в ближайшем будущем.

– Исследование приемной системы в интерферометрическом режиме в лаборатории позволяет провести комплексное исследование созданной приемной системы с внешними для нее устройствами: системой регистрации и системой

частотно-временной синхронизации. Данный эксперимент имеет решающее значение при оценке созданной приемной системы как основного элемента РСДБ-радиотелескопа и получения качественных результатов РСДБ-наблюдений в обсерватории. Кроме того эксперимент позволит оценить фазовую стабильность (стабильность задержки корреляционного отклика) и определить значение отношения сигнал-шум (*SNR*) для РСДБ-системы с участием созданной приемной системы в идеальных условиях. Комплексные исследования приемной системы с системой регистрации и системой частотно-временной синхронизации в лабораторных условиях позволят учесть особенности их работы.

3.1 Шумовая температура

Наиболее простым и распространенным в повседневной практике методом измерения шумовых параметров приемно-усилительных устройств является метод двух отсчетов или метод Y-фактора [59], структурная схема которого представлена на рисунке 3.1. Метод состоит в поочередной подаче на вход измеряемого устройства шумовых сигналов с известными значениями температуры шума T_1 и T_2 ($T_1 < T_2$) и измерении уровня сигналов на его выходе. Метод применим для измеряемого объекта (ИО), работающего в линейном режиме.

При поочередной подаче на вход измеряемого объекта шумовых сигналов, показания измерителя мощности α будут пропорциональными

$$\alpha_1 = G \cdot (T_1 + T_{\text{ио}}), \tag{3.1}$$

$$\alpha_2 = G \cdot (T_2 + T_{\text{ио}}), \tag{3.2}$$

где G — коэффициент передачи, $T_{\text{ио}}$ — шумовая температура измеряемого объекта. Решив совместно (3.1 и 3.2), получим:

$$T_{\text{ио}} = \frac{T_2 - n \cdot T_1}{n - 1}, \tag{3.3}$$

где $n=\alpha_2/\alpha_1$ — относительное изменение уровня мощности сигнала на выходе ИО при двух различных значениях температуры шума на его входе.

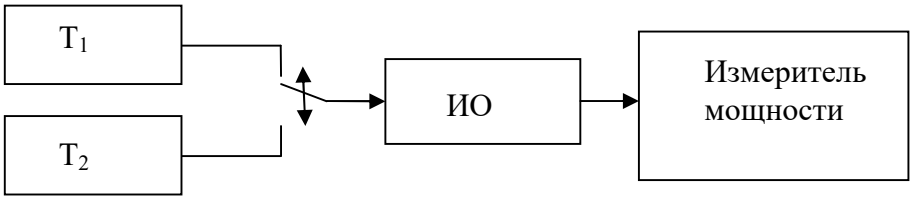


Рисунок.3.1.Структурная схема измерений шумовой температуры методом двух отсчетов.

Метод двух отсчетов предполагает подавать на вход ИО сигналы от калиброванных шумовых источников, таких как прецизионные генераторы шума. Однако, применение таких мощных источников имеет ограничения в части измерений малых уровней шумовой температуры, так как с ростом впрыскиваемого сигнала осложняется выделение на его фоне малого, вследствие чего, возрастает ошибка. Для уменьшения погрешности измерений, уровень шумовых сигналов на входе ИО выбирают сопоставимым с измеряемой величиной. Когда в качестве ИО выступает высокочувствительная радиоастрономическая приемная система с малошумящим криостатируемым приемным блоком на входе, то целесообразно использовать при измерениях его шумовых параметров охлаждаемую согласованную нагрузку, способную обеспечивать два уровня шумовых температур: T_{300} — при комнатной температуре излучателя и T_a — при заполнении нагрузки кипящим азотом. Кроме того, особенностью измерений эквивалентной шумовой температуры входа ПС и БПК является то, что БПК не имеет доступных для подключения согласованной нагрузки коаксиальных входов, только волноводный. Поэтому для измерений в качестве нагрузки используется согласованный отрезок волновода с конической вставкой радиопоглощающего материала, называемый далее низкотемпературный генератор шума (НГШ) (Рисунок 3.2).

Рисунок.3.2. Низкотемпературный генератор шума (НГШ), установленный на вход БПК.

При подстановке этих значений в формулу (3.3) для $T_{\text{ио}}$ получаем значение шумовой температуры измеряемого устройства:

$$T_{\text{ио}} = \frac{T_{300} - n \cdot T_{\text{а}}}{n - 1}. \tag{3.4}$$

Однако, полученное в результате измерения значение $T_{\text{ио}}$ включает в себя кроме значения температуры шума входа измеряемого устройства также составляющую за счет собственных шумов измерителя мощности:

$$T_{\text{ио}} = \frac{T_{300} - n \cdot T_{\text{а}}}{n - 1} - \frac{T_{\text{рег}}}{G_{\text{общ}}}. \tag{3.5}$$

Стоит отметить, что вклад собственных шумов измерителя мощности ($T_{\text{рег}}$) пренебрежимо мал, поэтому при дальнейшем расчете шумовой температуры ПС он не учитывался.

Для измерения шумовой температуры блока приемного криостатируемого (БПК) в составе разработанной приемной системы был собран измерительный стенд включающий: измеритель мощности Agilent N1914A, детекторы мощности 8487D и низкотемпературный генератор шума НГШ, схема измерительного стенда приведена на рисунке 3.3 Методика измерений основывается на методе двух отчетов приведенном выше.

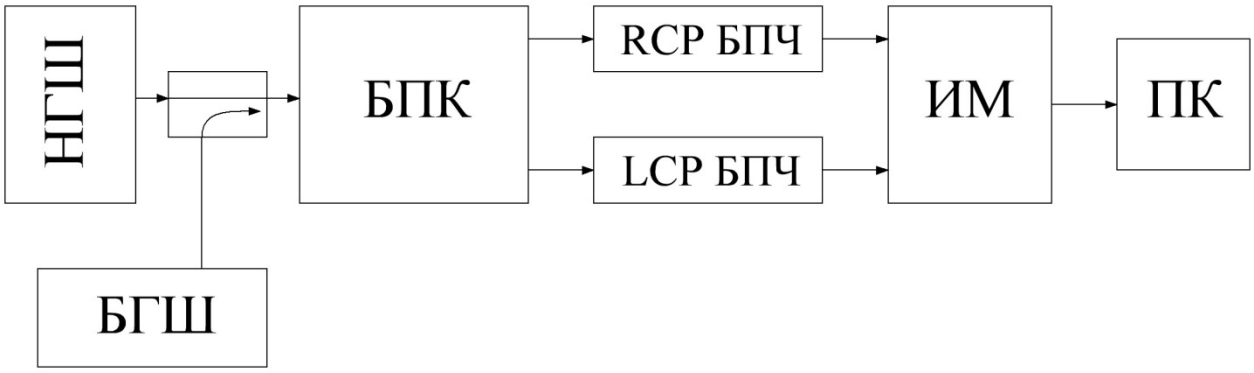


Рисунок 3.3. Схема стенда для измерения шумовой температуры БПК.

При проведении измерений БПК был выведен на криогенный режим. Измерения проводились в 2 этапа: (см. рисунок 3.4) в начале измерялась приемная система с теплым НГШ на входе БПК — уровень мощности $P_т$, в течение 20–30 с подавалась калибровка от БГШ — $P_{кт}$, затем на вход БПК устанавливался холодный НГШ и измерения повторялись. Уровень $P_х$ соответствует мощности выходного сигнала ПС при установленном холодном НГШ, $P_{кх}$ — уровень сигнала калибровки при холодном НГШ.

Измерения значений калибровок при теплом и холодном НГШ на входе БПК производилось для контроля линейности тракта измеряемой приемной системы. Значения калибровок, пересчитанные в единицы шумовой температуры (Кельвины) для разных НГШ различались меньше чем на 1%, что говорит о линейном режиме работы ПС при проведении измерений. Измеренные значения мощности сигналов калибровок, а так же значения температуры НГШ приведены в таблице 3.1. Стоит отметь, что $T_а$=82 К соответствует температуре НГШ с залитым азотом, пересчитанная из значения температуры кипения жидкого азота при заданных условиях окружающей среды и с учетом потерь на волноводном фланце

БПК. Были проведены несколько итераций измерений шумовой температуры с разными значениями физической температуры теплого НГШ (НГШ остывал в процессе измерения), также использовались разные каналы измерителя мощности, чтобы исключить влияние регистрации, в таблице 3.1. приведены средние типичные значения.

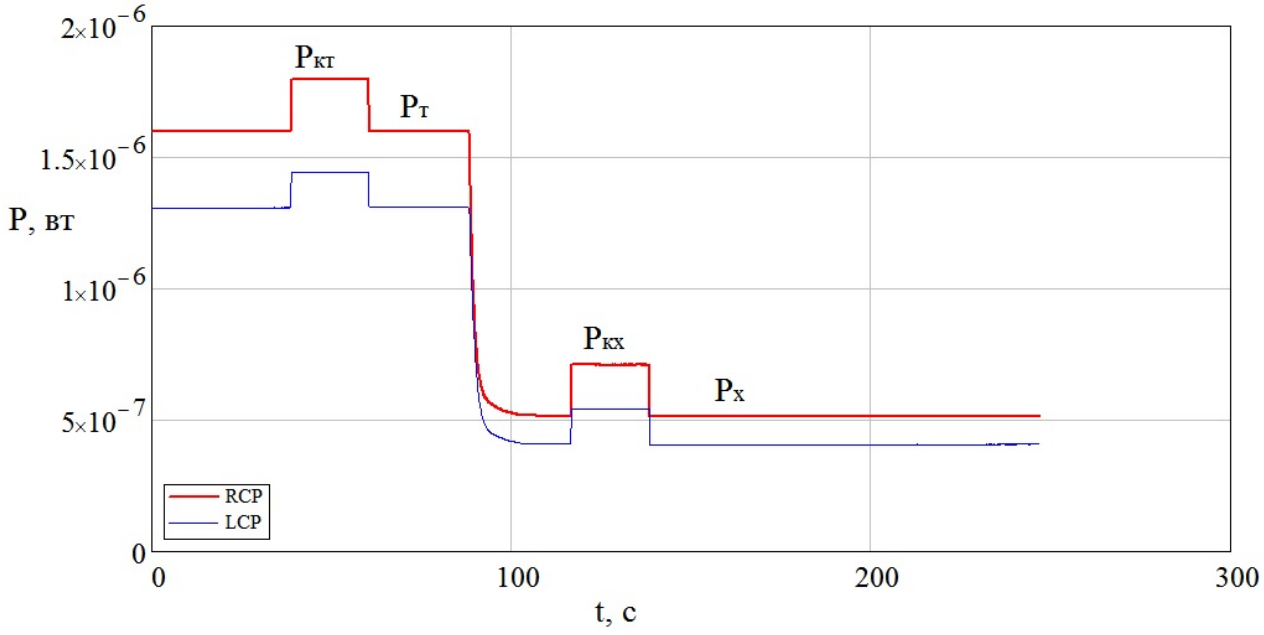


Рисунок 3.4. Выходной сигнал разработанной приемной системы, фиксируемый измерителем мощности при измерении шумовой температуры.

Таблица 3.1. Значения параметров ПС при измерении шумовой температуры.

Канал	$T_{фт}$, °C	Тем-ра теплой нагрузки T_{300}, К	Тем-ра холодной нагрузки $T_а$, К	Мощность при теплой нагрузке $P_т$, мкВт	Калиб-ка при теплой нагрузке $P_{кт}$, мкВт	Мощность при холодной нагрузке $P_х$, мкВт	Калиб-ка при холодной нагрузке $P_{кх}$, Вт	$P_т/P_х$ n	Измер. $T_{пр}$, К
RCP	17.0	290.0	82.0	1.6	1.8	0.5	0.7	3.15	15.0
LCP	17.0	290.0	82.0	1.3	1.4	0.4	0.5	3.16	14.0

Далее на вход созданной приемной системы был установлен входной волноводный СВЧ-тракт и проведены измерения шумовой температуры вместе с

ним. Значение T_a=82 К, использовалось такое же как для предыдущих измерений. Результаты измерений представлены в Таблице 3.2.

Таблица 3.2. Значения параметров ПС с волноводным трактом на входе при измерении шумовой температуры.

Канал	$T_{фт}$, °C	Тем-ра теплой нагрузки T_{300}, К	Тем-ра холодной нагрузки T_a, К	Мощность при теплой нагрузке $P_т$, мкВт	Калиб-ка при теплой нагрузке $P_{кт}$, мкВт	Мощность при холодной нагрузке $P_х$, мкВт	Калиб-ка при холодной нагрузке $P_{кх}$, Вт	$P_т/P_х$ n	Измер. $T_{пр+ф}$, К
RCP	17.0	290.0	82.0	1.6	1.8	0.6	0.7	2.93	26.0
LCP	17.0	290.0	82.0	1.3	1.4	0.4	0.6	2.94	25.0

По результатам измерений шумовая температура приемной системы без волноводного тракта в канале правой поляризации (RCP) составила 15 К, в канале левой поляризации (LCP) — 14 К. Шумовая температура приемной системы вместе с волноводным трактом в канале правой поляризации (RCP) составила 26 К, в канале левой поляризации (LCP) — 25 К. Отличие шумовой температуры в каналах разной поляризации минимально, но повторяется для разных каналов регистрации, это связано с технологическим отличием СВЧ-трактов БПК в этих каналах. Таким образом, согласно полученным результатам, вклад в шумовую температуру приемной системы от волноводного тракта составляет значение 11 К. В таблице 3.3 приведено сравнение расчетных и экспериментальных значений шумовой температуры БПК, волноводного тракта и приемной системы без облучателя.

Таблица 3.3. Сравнение расчетных и измеренных значений шумовой температуры созданной приемной системы.

	БПК	Волноводный тракт	ПС без облучателя
Расчет	14.7	11.3	27.3
Измерение RCP	15.0	11.0	26.0
Измерение LCP	14.0	11.0	25.0

Данные результаты позволяют говорить, что разработанный БПК соответствует поставленным требованиям и может служить основой приемной системы для передвижной РСДБ-станции в режиме совместной работы с РСДБ-комплексом

«Квазар-КВО». Кроме того результаты данного эксперимента показали хорошее согласование с расчетом. Использование входного волноводного СВЧ-тракта в разрабатываемой приемной системе для данной конструкции антенной системы РТ-4 позволили получить минимальные потери во входном тракте. Таким образом, можно сделать вывод, что разработанная аппаратура готова к размещению на радиотелескопе. При этом стоит учитывать, что в данных измерениях не учитывается шумовая температура облучателя. Измерения шумовой температуры созданной приемной системы вместе с облучателем целесообразно проводить после размещения аппаратуры на радиотелескопе РТ-4, данные измерения будут описаны в следующей главе.

3.2 Нелинейные характеристики

В общем случае цепи, содержащие полупроводниковые компоненты, например, усилители или смесители, вносят нелинейности либо нелинейности могут быть вызваны внешними факторами, к примеру, помехами. При радиометрических измерениях либо измерениях параметров радиотелескопа линейность приемной системы крайне важна. Поэтому для разработанной приемной системы, и для БПК в частности, необходимо провести измерения характеристик нелинейности, таких как динамический диапазон, точка 1 дБ компрессии, динамический диапазон, свободный от интермодуляционных искажений, и параметр IP_3. И при необходимости произвести дополнительную настройку МШУ, замену либо изменение параметров определенных элементов тракта, вызывающих нелинейные искажения в БПК и во всей приемной системе.

Рассмотрим методику исследования нелинейности адаптированную для разработанной радиоастрономической приемной системы [А14]. В случае нелинейности системы ее передаточная функция может быть аппроксимирована степенным рядом следующим образом:

$$v_{\text{вых}}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n v_{\text{вх}}^n(t) = a_1 v_{\text{вх}}(t) + a_2 v_{\text{вх}}^2(t) + a_3 v_{\text{вх}}^3(t) + \cdots, \tag{3.6}$$

где $v_{вых}(t)$ — напряжение на выходе цепи; $v_{вх}(t)$ — напряжение на входе цепи; a_n — коэффициент нелинейного элемента в функции передачи. В большинстве случаев достаточно учитывать слагаемые 3-го порядка, поэтому в выражении (3.6) нужно анализировать члены до n=3. Влияние нелинейности четырехполюсника на прошедший сигнал зависит от уровня входного сигнала. Для исследования характеристик нелинейности устройства обычно используются два метода: метод одночастотного входного сигнала и двухчастотного (или бигармонического) сигнала [60]. Для относительно узкополосных устройств, как например, в случае с разрабатываемой приемной системой с входной полосой 8.2–9.1 ГГц предпочтительнее использовать в качестве основы двухчастотный метод.

При двухчастотном входном сигнале на вход устройства подается сигнал $V_{вх}(t)$, состоящий из двух синусоидальных сигналов. В этом случае входной сигнал выражается формулой:

$$V_{вх}(t) = U_{вх} sin\left(2nf_{вх,1} \cdot t\right) + U_{вх} sin\left(2nf_{вх,2} \cdot t\right), \quad (3.7)$$

где $U_{вх}$ — амплитуда, одинаковая для двух синусоидальных сигналов; $f_{вх,1}$, $f_{вх,2}$ — частоты сигнала.

Подставляя выражение (3.7) в нелинейную передаточную функцию, определяемую уравнением (3.6), на выходе цепи в числе прочих получим продукты смешения.

В дополнение к гармоникам вырабатываются интермодуляционные продукты (рисунок 3.5), называемые также разностно-частотными искажениями. Порядок интермодуляционных искажений соответствует сумме порядковых номеров взаимодействующих компонентов. Для компонента на частоте $2f_{вх,1}+f_{вх,2}$, например, порядок равен 2+1=3.

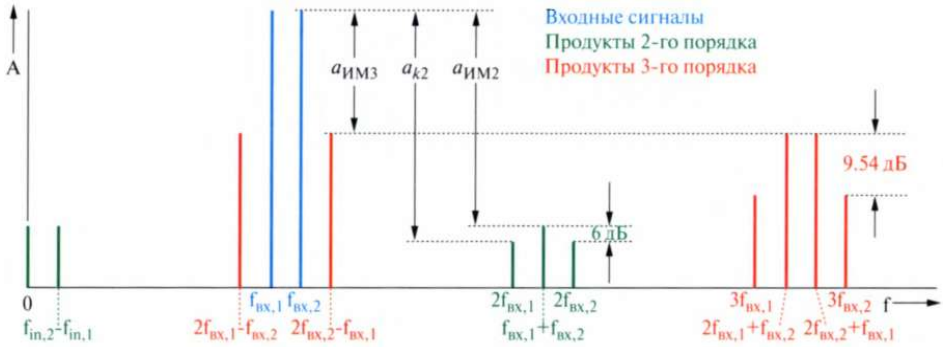


Рисунок 3.5. Выходной спектр нелинейной цепи при двухчастотном входном сигнале.

В то время как интермодуляционные продукты с четными номерами всегда возникают вдали от частот двух входных сигналов, интермодуляционные продукты с нечетными номерами всегда обнаруживаются в непосредственной окрестности спектра входного сигнала.

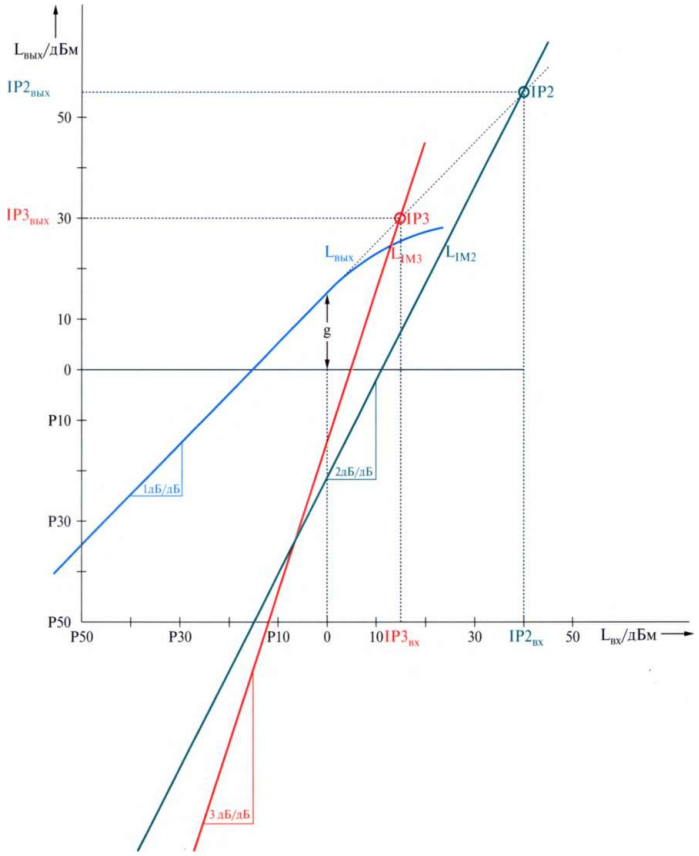


Рисунок 3.6. Точки пересечения с продуктами интермодуляции 2-го и 3-го порядка.

В большинстве случаев указываются точки пересечения 2-го и 3-го порядков (рисунок 3.6). Они обозначаются как IP_2 (пересечение 2-го порядка) и IP_3 (пересечение 3-го порядка) по входу. Входные уровни точек пересечения второго и третьего порядков определяются так:

$$IP_{2_{\text{вх}}} = a_{\text{ИМ2}} + L_{\text{вх}} \tag{3.8}$$

и

$$IP_{3_{\text{вх}}} = \frac{a_{\text{ИМ3}}}{2} + L_{\text{вх}}. \tag{3.9}$$

Значения координат точек пересечения по выходу могут быть рассчитаны на основе координат точек пересечения по входу, путем добавления к ним коэффициента усиления цепи (в дБ). В характеристиках анализатора спектра обычно координаты точек пересечения указываются по входу.

Рассмотрим методику и результаты исследования нелинейности БПК разработанной приемной системы по бигармоническому сигналу. На вход БПК подключался НГШ, работающий в «теплом» режиме (300 К). Бигармонический сигнал подается на БПК через встроенный направленный ответвитесь, при этом при дальнейшей обработке учитывается переходное ослабление направленного ответвителя на частотах сигнала. Сам БПК выведен на криогенный режим. На рисунке 3.7 представлена передаточная характеристика левого канала БПК, измеренная по бигармоническому сигналу с частотами f_1=8.63 ГГц и f_2=8.66 ГГц. Показан уровень 1-ой гармоники (линия 1), уровень интермодуляционной компоненты третьего порядка (линия 2), а также уровень шума $N_{\text{БПК}}$=-144 дБм/Гц, регистрируемый на выходе БПК в отсутствии радиосигнала, приведенный к полосе 1 Гц. Измеренный коэффициент передачи левого канала БПК G=28 дБ. Точка компрессии по входу $P_{1\text{dB}}$=-34 дБм (по отклонению передаточной характеристики от линейной зависимости на 1 дБ), а минимальный уровень $P_{\text{мин}}$=-173 дБм (определяется пересечением линии 1 уровня шума $N_{\text{БПК}}$). Уровень $P_{\text{мин}}$ задает мощность минимально регистрируемой узкополосной спектральной компоненты входного СВЧ-сигнала, когда на выходе блока отношение мощностей регистрируемого сигнала и шума в

полосе 1 Гц равны. Таким образом, динамический диапазон левого канала БПК оценивается как $DR=P_{1дБ}/P_{мин}$=-34–(- 173)=139 дБ. Динамический диапазон, свободный от гармоник входного сигнала — $SFDR$=(-70 дБм)–$P_{мин}$=103 дБ. Уровень входного сигнала IP_3 по входу, характеризующий интермодуляционные искажения третьего порядка, составляет -20 дБм (при пересечении линий 1 и 2). Измерения проведены с использованием генераторов СВЧ сигналов Agilent E8257D, встроенного генератора векторного анализатора цепей Rohde&Schwarz ZVA40 и анализатора спектра Agilent N9030A. Методика измерений и лабораторный стенд подробно описаны в работе [А14].

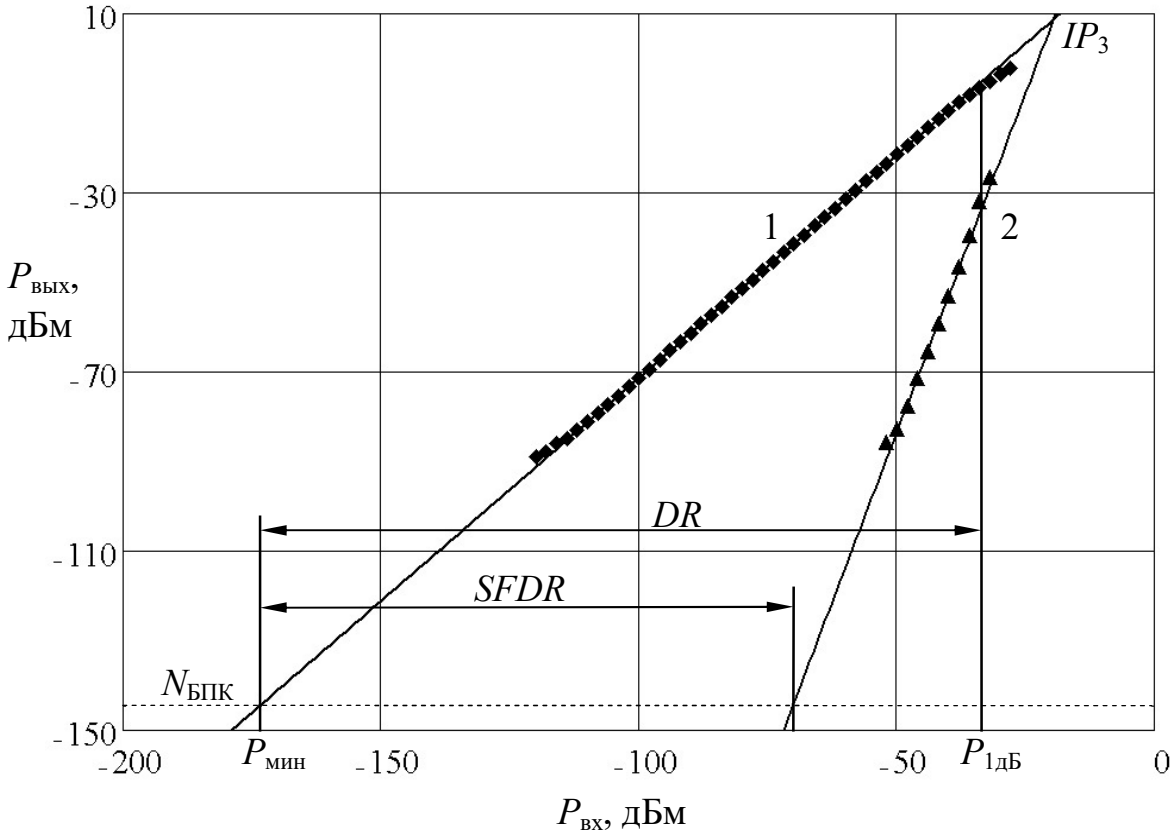


Рисунок 3.7. Зависимости мощности СВЧ сигнала на выходе БПК от мощности СВЧ сигнала на его входе.

Такие же измерения были проведены для правого канала БПК Измеренный коэффициент передачи правого канала БПК G=28 дБ. Точка компрессии по входу $P_{1дБ}$=-30 дБм, а минимальный уровень $P_{мин}$=-173 дБм. Таким образом, динамический диапазон БПК для правого канала оценивается как $DR=P_{1дБ}/P_{мин}$=-30–(-173)

=143 дБ. Динамический диапазон, свободный от гармоник входного сигнала — *SFDR*=(-69 дБм)–$P_{мин}$=104 дБ. Для правого канала БПК уровень входного сигнала IP_3 по входу, характеризующий интермодуляционные искажения третьего порядка, составляет -15 дБм.

Отклонение Δ передаточной характеристики обоих каналов БПК от линейной зависимости представлено на рисунке 3.8. Значение Δ равное 1 дБ определяет точку компрессии $P_{1дБ}$ — параметр, характеризующий нелинейные свойства устройства.

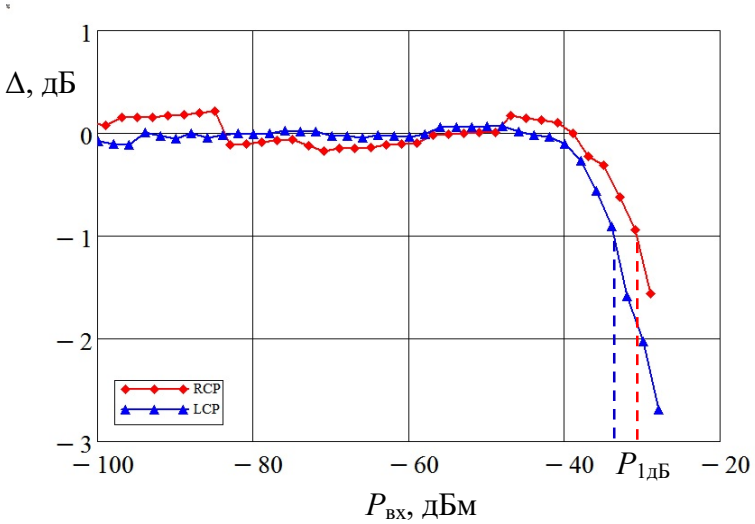


Рисунок 3.8. Определение точки компрессии $P_{1дБ}$ БПК.

Далее по данной методике будут рассмотрены параметры нелинейных искажений всей приемной системы, так как известно, что при каскадном соединений нескольких нелинейных элементов интермодуляционные искажения могут значительно увеличиться [61]. Поэтому важно провести измерения характеристик нелинейности, таких как динамический диапазон, точка 1 дБ компрессии, динамический диапазон, свободный от интермодуляционных искажений, и параметр IP_3 для разработанной приемной системы. И при необходимости добавить аттенюаторы между БПЧ и БПК либо заменить определенные элементы тракта, вызывающие нелинейные искажения в приемной системе (ПС).

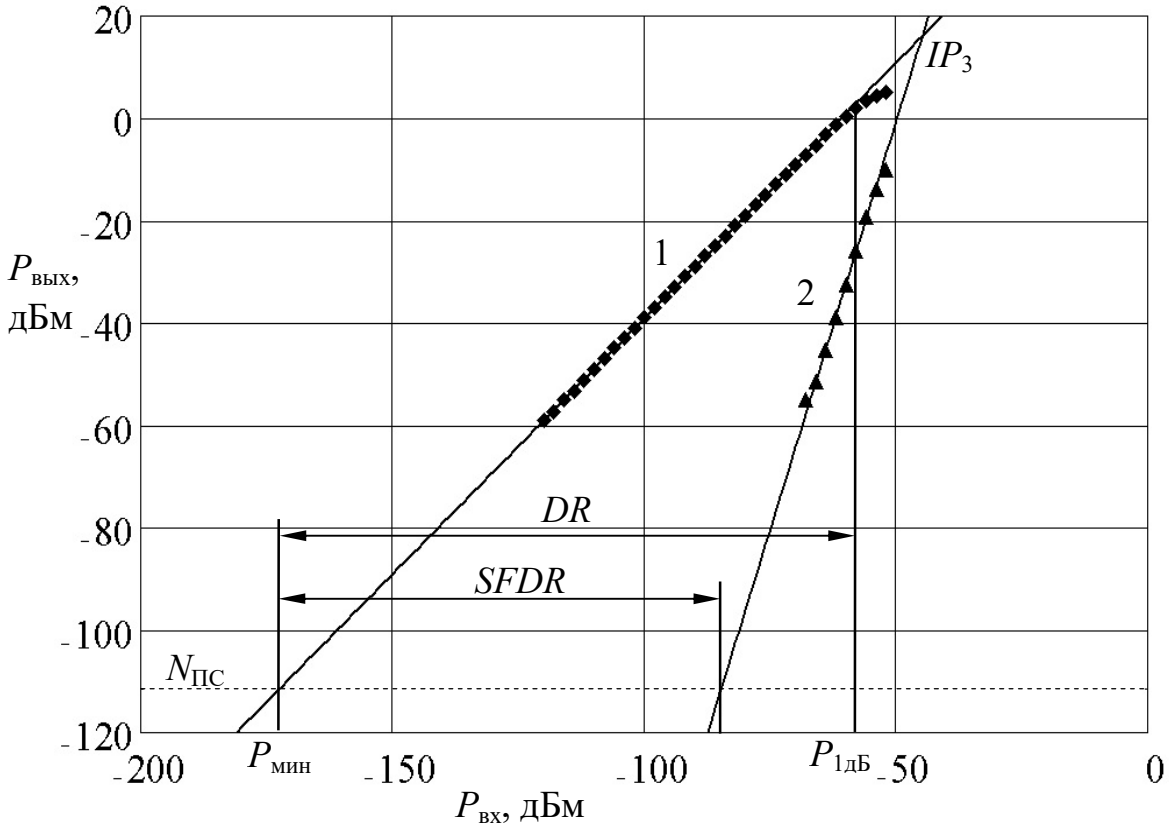


Рисунок 3.9. Зависимости мощности СВЧ сигнала на выходе ПС от мощности СВЧ сигнала на ее входе в правом канале.

На рисунке 3.9–3.10 представлены передаточные характеристики правого и левого канала ПС (RCP и LCP) соответственно, измеренные по бигармоническому сигналу с частотами f_1=8.63 ГГц и f_2=8.66 ГГц, при этом за счет частотного преобразования на выходе ПС f_1=550 МГц и f_2=580 МГц. На вход ПС (вход БПК) подключался НГШ, работающий в «теплом» режиме (300 К). Бигармонический сигнал подавался на БПК через встроенный направленный ответвитесь, при этом при дальнейшей обработке учитывалось переходной ослабление направленного ответвителя на частотах f_1=8.63 ГГц и f_2=8.66 ГГц. Сам БПК выведен на криогенный режим. Показаны уровни 1-ой гармоники (линия 1), уровни интермодуляционной компоненты третьего порядка (линия 2), а также уровни шума ПС $N_{ПС}$=-112 дБм/Гц, регистрируемые на выходе обоих каналов ПС в отсутствии радиосигнала, приведенный к полосе 1 Гц.

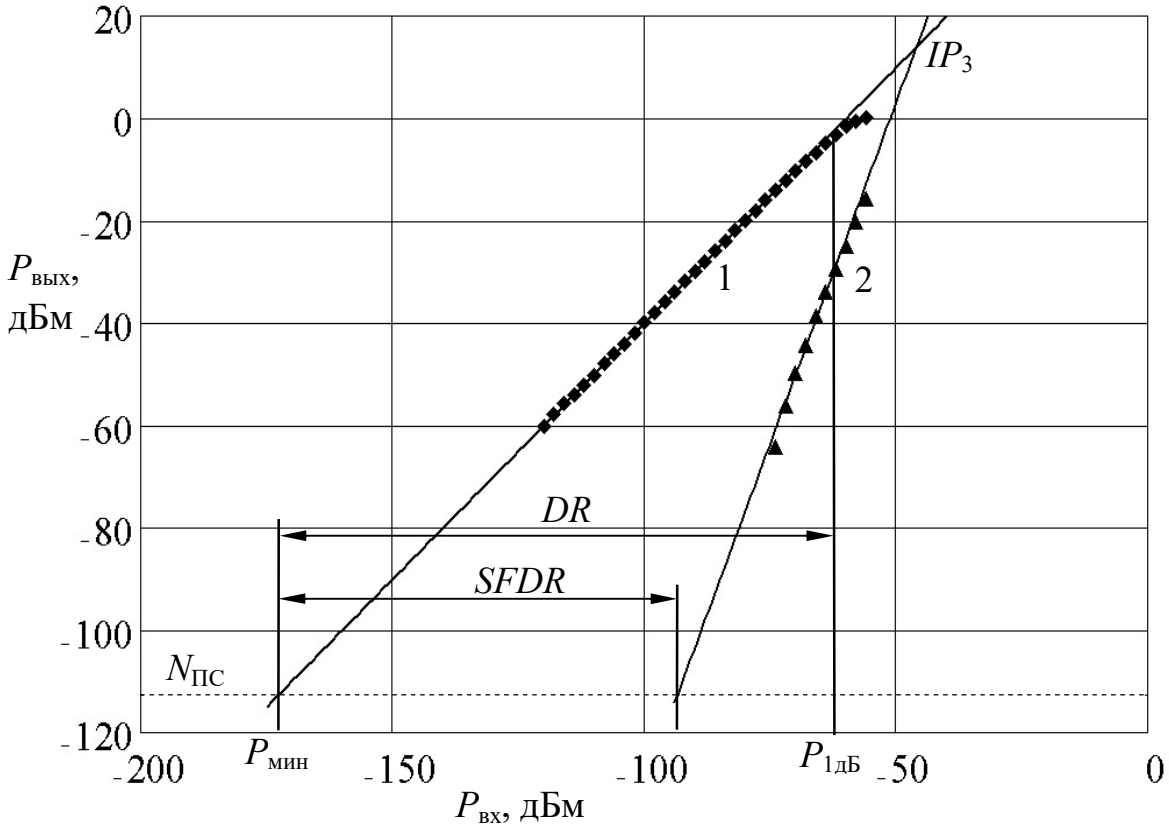


Рисунок 3.10. Зависимости мощности СВЧ сигнала на выходе ПС от мощности СВЧ сигнала на ее входе в левом канале.

Измеренный коэффициент передачи правого канала ПС G=61.5 дБ, для левого канала ПС G=60 дБ. Для правого канала ПС точка компрессии P_{1dB}=-57 дБм (по отклонению передаточной характеристики от линейной зависимости на 1 дБ), а минимальный уровень $P_{мин}$ = -173 дБм (определяется пересечением линии 1 и уровня шума $N_{ПС}$). Для левого канала ПС P_{1dB}=-63 дБм, $P_{мин}$=-173 дБм. Уровень $P_{мин}$ задает мощность минимально регистрируемой узкополосной спектральной компоненты входного СВЧ сигнала, когда на выходе блока отношение мощностей регистрируемого сигнала и шума в полосе 1 Гц равны. Таким образом, динамический диапазон правого канала ПС оценивается как $DR=P_{1дБ}/P_{мин}$=-57–(-173)= 116 дБ, а для левого $DR=P_{1дБ}/P_{мин}$=-63–(-173)=110 дБ. Динамический диапазон, свободный от гармоник входного сигнала: для RCP $SFDR$=(-85дБм)–$P_{мин}$=88 дБ; для LCP $SFDR$=(-93дБм)–$P_{мин}$=80 дБ. Уровень входного сигнала IP_3, характеризующий интермодуляционные искажения третьего порядка (пересечение линий 1

и 2), составляет -45 дБм для обоих каналов ПС. Измерения проведены с использованием генераторов СВЧ сигналов Agilent E8257D, встроенного генератора векторного анализатора цепей Rohde & Schwarz ZVA40 и анализатора спектра Agilent N9030A.

Отклонение Δ передаточной характеристики обоих каналов ПС от линейной зависимости представлено на рисунке 3.11. Значение Δ равное 1 дБ определяет точку компрессии $P_{1дБ}$. Для правого канала ПС точка компрессии по входу $P_{1дБ}$=-57 дБм, для левого канала ПС $P_{1дБ}$=-63 дБм.

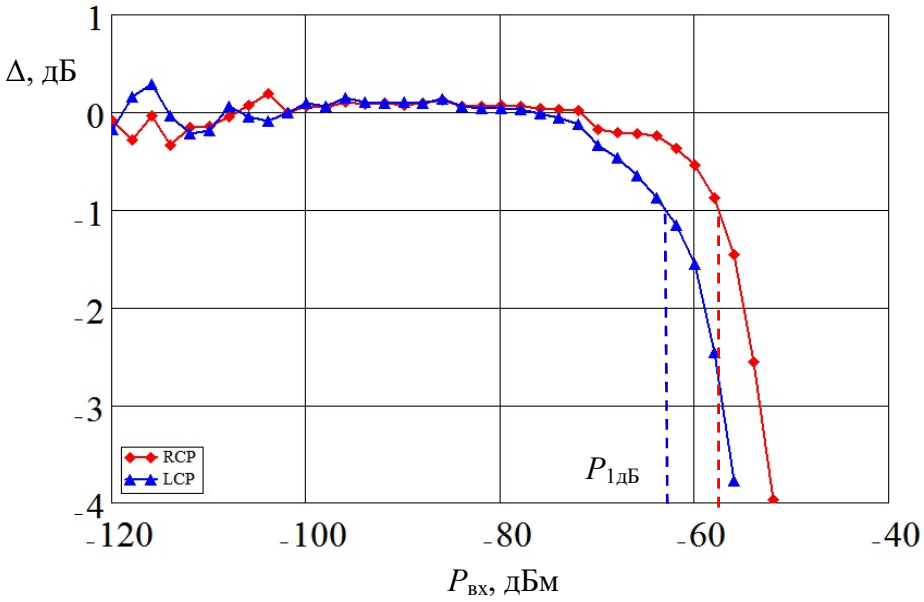


Рисунок 3.11. Отклонение Δ передаточной характеристики ПС. Определение точки компрессии $P_{1дБ}$ приемной системы.

Специфика использования разработанной приемной системы предполагает наблюдения радиоисточников с разными потоками, а соответственно и разной принимаемой мощностью. Если речь идет о радиоинтерферометрических наблюдениях в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», то характерная принимаемая мощность на входе БПК определяется собственными шумами системы радиотелескоп-радиометр и может быть рассчитана по известной формуле:

$$P_{вх} = kT_{сис}\Delta f, \qquad (3.10)$$

где k — постоянная Больцмана, $T_{сис}$=50 К — шумовая температура системы радиотелескопа РТ-4, Δf=900 МГц — принимаемая полоса частот. Таким образом, значение принимаемой мощности составит -91.8 дБм. Для радиометрических наблюдений наиболее мощный источник — Солнце, согласно (1.6) выражение (3.10) в таком случае примет вид:

$$P_{вх} = \frac{F A_{эфф} \Delta f}{2}, \tag{3.11}$$

где $A_{эфф}$ — эффективная площадь радиотелескопа;

$A_{эфф}=КИП \cdot A_{геом}$, $A_{геом}$ — площадь апертуры антенны;

F— плотность потока источника, типичный поток для активного Солнца в сантиметровом диапазоне длин волн $F=10^6$ Ян, что соответствует принимаемой мощности $P_{вх}$=-71 дБм, однако в отдельных случаях поток может быть10^8 Ян [62]. Соответственно наблюдение вспышек на Солнце может потребовать установки дополнительных аттенюаторов между БПК и БПЧ.

Что касается помеховой обстановки, то на данный момент *X*-диапазон достаточно свободен от помех, к тому же использование передвижной РСДБ-станции с созданной приемной системой предполагается в относительно удаленных районах. Однако, необходимо учитывать развитие современных телекоммуникационных устройств, работающих все ближе к *X*-диапазону частот.

Адаптированная методика измерения параметров нелинейности СВЧ-тракта приемной системы по бигармоническому сигналу позволила получить передаточные характеристики блоков СВЧ-тракта, рассчитать динамический диапазон приемной системы по точке компрессии 1 дБ и динамический диапазон, свободный от интермодуляционных искажений. Полученные результаты позволяют выбрать оптимальный режим работы разработанной приемной системы в составе передвижной РСДБ-станции.

3.3 Характеристики приемной системы в составе лабораторного макета радиоинтерферометра

В предыдущих пунктах были представлены результаты исследования в основном амплитудных характеристик разработанной приемной системы. Однако, как известно, для РСДБ-наблюдений в отличие от радиометрических наблюдений крайне важны фазовые характеристики приемного тракта. Кроме того, так как разработанная приемная система для передвижной РСДБ-станции в первую очередь будет работать в составе радиоинтерферометра, необходимо провести комплексное исследование созданной приемной системы с системами регистрации и частотно-временной синхронизации в лабораторных условиях.

Одной из главных характеристик радиоинтерферометра, обеспечивающих его точностные характеристики, является точность определения задержки корреляционного отклика. Как известно, для определения поправок Всемирного времени со среднеквадратическим отклонением (СКО) не более 20 мкс с учетом широтного расположения обсерваторий комплекса «Квазар-КВО» СКО определения задержки корреляционного отклика должно быть не более 20 пс [63]. Это требование предъявляется для новейшего отечественного радиоинтерферометра с радиотелескопами РТ-13, однако оно актуально и для радиотелескопа РТ-4, так как планируется их совместная работа в составе РСДБ-сети. При работе радиотелескопа РТ-4 совместно с радиотелескопами РТ-13 и РТ-32 в обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» в штатном режиме выделить погрешности, влияющие на точность определения задержки, крайне сложно из-за множества факторов, присутствующих в месте расположения радиотелескопов (погодные условия, условия эксплуатации, помехи и др.). Для обеспечения стабильности и воспроизводимости условий при измерениях точности определения задержки радиоинтерферометром их целесообразно проводить в лабораторных условиях. На определение задержки корреляционного отклика радиоинтерферометра влияет стабильность инструментальной задержки сигнала в приемно-регистрирующей аппаратуре. Измерения характеристик составных частей аппаратуры радиотелескопов с целью оценки параметров радиоинтерферометра в целом, как правило, недостаточно, так как при

этом не учитывается взаимодействие составных частей. Для комплексного исследования составных частей в лабораторных условиях целесообразно использовать лабораторный стенд радиоинтерферометра, включающий приемные системы, системы регистрации и систему частотно-временной синхронизации.

На рисунке 3.12 изображена структурная схема стенда лабораторного радиоинтерферометра. В состав стенда входят разработанная приемная система (ПС РТ-4) и приемные системы комплекса «Квазар-КВО», в частности, трехдиапазонная радиоастрономическая приемная система (РПС) радиотелескопа РТ-13, широкополосная приемная система (ШПС) радиотелескопа РТ-13 и приемная система *X*-диапазона частот радиотелескопа РТ-32 (ПС-РТ-32), характеристики и принцип работы данных приемных систем были описаны ранее в параграфе 1.3. В качестве сигнала от космического радиоисточника используется сигнал от широкополосного блока генераторов шума (ШБГШ). Сигнал с помощью делителей подается на входы приемных систем через штатные направленные ответвители (НО) расположенные в входных криогенных блоках (в БПК — для ПС РТ-4, в КПФБ — для РПС; в ШКПФБ — для ШПС и в *X*-криоблоке для ПС РТ-32). В стенде интерферометра на входы приемных систем устанавливаются согласованные нагрузки (СН), в случае РПС и ШПС они перекрывают всю входную апертуру облучателей, в случае ПС РТ-32 используется коаксиальная СН, а для ПС РТ-4 в качестве согласованной нагрузки используется НГШ (рисунок 3.2). Уровень сигнала от ШБГШ, задающий отношение сигнал-шум (*SNR*) на выходе приемных систем, регулируется с помощью управляемого аттенюатора ШБГШ. Мощность выходных сигналов $u_1(t)…u_4(t)$ для приемных систем во всех каналах стенда устанавливается одинаковой с помощью аттенюаторов.

Все приемные системы, использующиеся в стенде интерферометра, являются супергетеродинными приемниками, однако, РПС и ШПС преобразуют входные диапазоны частот в полосу промежуточных частот (ПЧ) в диапазоне 1–2 ГГц, а разработанная приемная система и приемная система РТ-32 преобразуют входные диапазоны частот в полосу ПЧ в диапазоне 0.1–1 ГГц. Гетеродины во всех прием-

ных системах настраиваются на работу с входным диапазоном частот 8.592–9.104 ГГц.

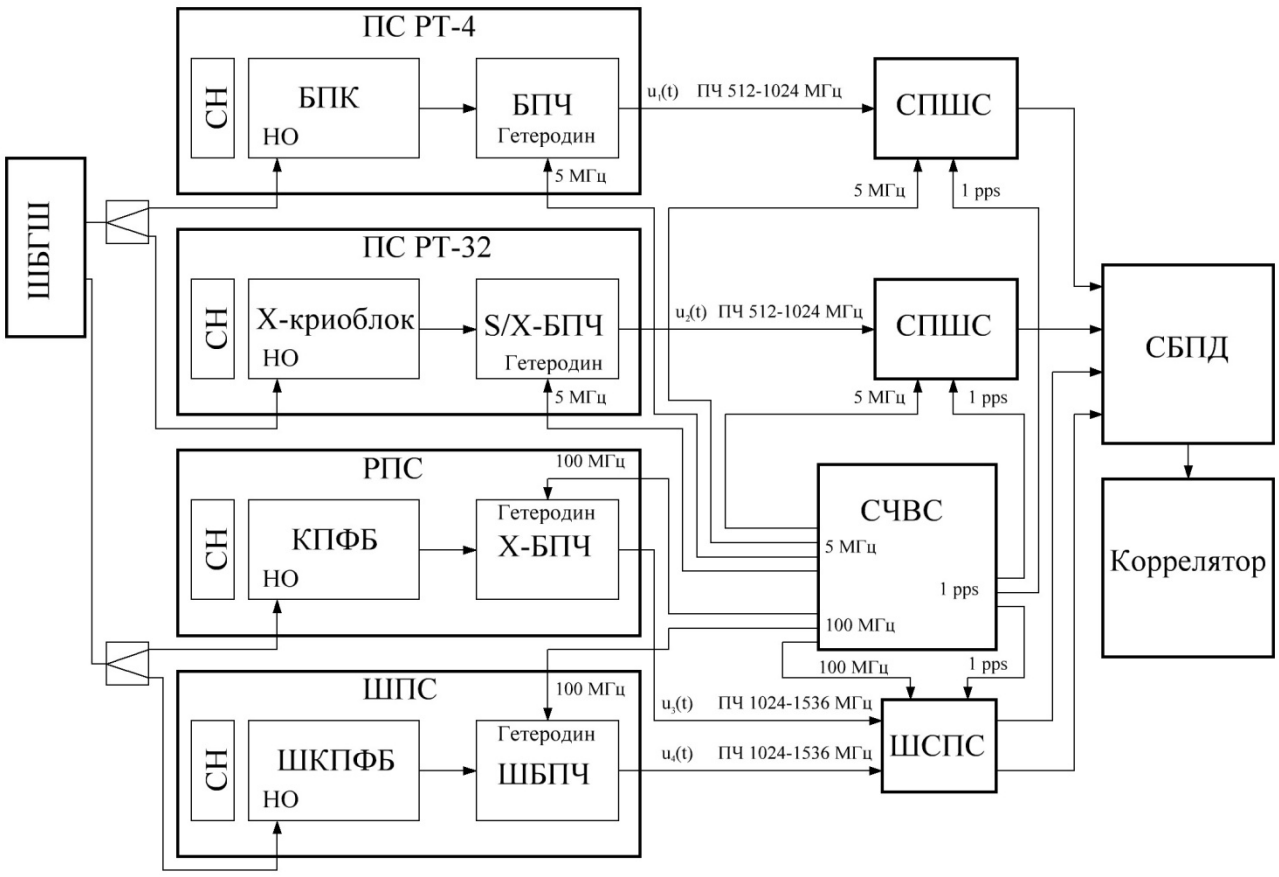


Рисунок 3.12. Функциональная схема стенда лабораторного интерферометра.

Выходные сигналы РПС и ШПС поступают на широкополосную систему преобразования сигналов (ШСПС) с рабочей полосой 1024-1536 МГц, оцифровывающей сигналы с частотой дискретизации 1024 МГц в третьей зоне Найквиста с двухбитовым квантованием [64]. В свою очередь, выходные сигналы разработанной ПС РТ-4 и ПС РТ-32 поступают на соответствующие каналы модулей системы преобразования широкополосных сигналов (СПШС) с рабочей полосой 512-1024 МГц, оцифровывающей сигналы с частотой дискретизации 1024 МГц во второй зоне Найквиста с двухбитовым квантованием, данные факторы учитываются при последующей обработке на коррелляторе.

Синхронизация ПС РТ-4, ПС РТ-32 и СПШС осуществляется сигналами опорной частоты 5 МГц, а РПС, ШПС и ШСПС сигналами частоты 100 МГц от системы частотно-временной синхронизации (СЧВС). Кроме того от СЧВС подаются сигналы 1 pps на системы регистрации. С помощью системы буферизации и

передачи данных (СБПД) [65] цифровые потоки данных передаются на корреляторе. В общем случае коррелятор вычисляет комплексную взаимную корреляционную функцию (ВКФ):

$$C(\tau) = \int_{t_н} u_1(t) \cdot u_2(t+\tau)dt\,, \tag{3.12}$$

где $t_н$ — период накопления, u_1 и u_2 — сигналы, зарегистрированные на радиотелескопах интерферометра, τ — задержка прихода фронта волны между двумя радиотелескопами. В случае дискретных сигналов T (и τ) определяется шагом дискретизации $t_д$, $t_д = 1/f_д$, $f_д$ — частота дискретизации; $T = M \cdot t_д$, M — число используемых в вычислении отсчетов дискретных сигналов. При этом преобразование Фурье $F\{C(\tau)\}$ соответствует взаимному корреляционному спектру мощности сигналов $u_1(t)$ и $u_2(t)$. После вычисления корреляционной функции по отношению ее максимума к СКО шума вне максимума определяется отношение сигнал-шум (*SNR*). По смещению максимума ВКФ (относительно τ=0) определяется временная задержка сигналов.

При обработке сигналов, зарегистрированных на разнесенных на большое расстояние радиотелескопах в процессе наблюдения источника излучения из-за вращения Земли неизбежно возникает эффект Доплера, который необходимо скомпенсировать. Нескомпенсированной (остаточной) разницей доплеровских частот каналов интерферометра является частота интерференции (единицы мГц) соответствующая скорости изменения задержки [А6]. При измерениях на стенде радиоинтерферометра ненулевая частота интерференции будет свидетельствовать о взаимном расхождении частоты гетеродинов, таким образом, мы можем проверить работу гетеродинов в составе интерферометра с высокой точностью в лабораторных условиях.

Для оценки инструментальных погрешностей аппаратуры радиотелескопа РТ-4 производилось сравнение расчетных и фактически полученных значений отношения сигнал-шум и задержки τ корреляционного отклика. Согласно (1.5), от-

ношение сигнал-шум (*SNR*) в корреляционном отклике может быть рассчитано по формуле:

$$SNR = \eta \sqrt{\frac{T_{\text{сиг1}}\, T_{\text{сиг2}}}{T_{\text{сис1}} T_{\text{сис2}}} (2\Delta f t)}, \tag{3.13}$$

где $T_{\text{сиг i}}$ — шумовая температура полезного сигнала (в лабораторных экспериментах это не сигнал от космического источника радиоизлучения, а сигнал от ШБГШ, вводимый через направленные ответвители во входные каскады соответствующих приемных систем см. рисунок 3.12), $T_{\text{сис i}}$ — шумовая температура системы «приемник + согласованная нагрузка», Δf — полоса частот системы регистрации, t — время накопления, η— коэффициент, учитывающий потери при квантовании сигналов и их обработке, для 2-битового квантования $\eta = 0.88$.

Ожидаемое значение СКО определения задержки корреляционного отклика $\sigma_{\text{расч}}$ рассчитывается согласно (1.3–1.7) по формуле:

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{\sqrt{12}}{2\pi \cdot \Delta f \cdot SNR}. \tag{3.14}$$

Постпроцессорное программное обеспечение коррелятора в используемом режиме работы позволяет определять положение пика корреляционной функции с дискретом 1 пс [66]. Значение задержки определяется с точностью $\sigma_{\tau_з}$, которое зависит от расчетного СКО $\sigma_{\text{расч}}$, определяемого отношением сигнал-шум, и аппаратного СКО задержки $\sigma_{\text{ап}}$, обусловленного нестабильностью задержки в аппаратуре [67]:

$$\sigma_{\tau_з} = \sqrt{\sigma^2_{\text{расч}} + \sigma^2_{\text{ап}}}. \tag{3.15}$$

Проведены непрерывные 30-минутные и 1-минутные сеансы и определены параметры корреляционного отклика при разном времени накопления, в таблице 3.4 приведены результаты минутных сеансов при времени накопления 1 секунда. Значения *SNR* и СКО задержки $\sigma_{\tau_з}$ сопоставлены с их расчетными значениями по формулам (3.13–3.15). Например, для базы ПС РТ-4 ПС-РТ-32 расчетное значение *SNR* корреляционного отклика рассчитано следующим образом: с помощью изме-

рителя мощности Agilent N1914A определено отношение $T_{сиг}/T_{сис}$=0.00141 для ПС РТ-4 и значение $T_{сиг}/T_{сис}$=0.001 для ПС РТ-32, Δf=512 МГц, время накопления t=1 с. Таким же образом, непосредственно перед сеансами, при калибровке стенда были определены значения $T_{сиг}/T_{сис}$ для остальных приемных систем.

Таблица 3.4. Результаты измерений параметров корреляционного отклика на стенде интерферометра на 1-минутном сеансе с интервалом накопления 1 с.

База	*SNR*		$\sigma_{\tau_з}$ (пс)		
	расчетное	измеренное	расчетное	измеренное	аппаратное
ПС РТ-4 — ПС РТ-32	33	32	35	45	28
ПС РТ-4 — ШПС	34	33.5	33	46	32
ПС РТ-4 — РПС	32	32	34	47	32
ПС РТ-32 — ШПС	29	29	37	45	27
ПС РТ-32 — РПС	27	26	42	49	27
ШПС — РПС	28	28	39	48	28

Как видно из результатов для времени накопления 1 секунда, для заданного отношения $T_{сиг}/T_{сис}$ различие расчетных и измеренных значений *SNR* для всех «баз» минимально. Измеренные значения СКО задержки $\sigma_{\tau_з}$ и расчетные значения $\sigma_{расч}$ хорошо соотносятся для всех баз интерферометра. Разница между расчетными и измеренными значениями связана со стабильностью приемно-регистрирующего тракта на данном интервале и обусловлена аппаратным СКО задержки $\sigma_{ап}$ согласно формуле (3.15). Отметим, что все приемные системы в данном эксперименте «теплые». В целом результаты данного исследования показывают, что характеристики созданной приемной системы соответствуют аппаратуре, использующейся на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО». Кроме того ПС РТ-4 корректно взаимодействует с системой регистрации СПШС (предлагаемая для установки на передвижной РСДБ-станции) и системой частотно-временной синхронизации.

Для проверки работоспособности созданной приемной схемы на криогенном режиме работы в составе интерферометра на стенде (рисунок 3.12) был проведен 30-минутный сеанс. В данном сеансе использовались три приемные системы: ПС РТ-4, РПС и ШПС (ПС РТ-4 и ШПС находились на криогенном

режиме). Расчетные значения *SNR* и СКО задержки определялись изложенным ранее методом. Результаты 30-минутного сеанса с интервалом накопления 64 секунды приведены в таблице 3.5. На 30-минутном сеансе при среднем для РСДБ-наблюдений *SNR* около 350 СКО задержки составило 5 пс (для полосы 512 МГц на базе ПС РТ-4 — ШПС). В соответствии с формулой (3.15) СКО задержки сигналов в аппаратуре лежит в пределах 4–6 пс для всех приемных систем, принимавших участие в эксперименте. Полученные результаты показывают, что приемно-регистрирующая аппаратура для радиотелескопа РТ-4 удовлетворяет требованиям по измерению радиоинтерферометром временной задержки сигналов радиотелескопами со среднеквадратической погрешностью не более 20 пс.

Таблица 3.5. Результаты измерений параметров корреляционного отклика на стенде интерферометра на 30-минутном сеансе с интервалом накопления 64 секунды.

База	*SNR*		$\sigma_{\tau_з}$ (пс)		
	расчетное	измеренное	расчетное	измеренное	аппаратное
ПС РТ-4 — ШПС	445	443	2.5	4.8	4.3
ПС РТ-4 — РПС	275	277	4.0	7.3	6.0
ШПС — РПС	354	353	3.1	6.7	5.9

Созданный стенд радиоинтерферометра с «нулевой базой» позволил с помощью определения параметров корреляционного отклика провести комплексные лабораторные исследования разработанной приемной системы вместе с системой регистрации и системой частотно-временной синхронизации в интерферометрическом режиме, а также моделировать эксперименты, проведение которых в обсерваториях затруднительно или невозможно. Исследование созданной ПС для передвижной РСДБ-станции показало, что вносимые ей и системой регистрации СКО задержки составляют порядка 5 пс (для двух охлажденных приемных систем ПС РТ-4 и ШПС). Результаты показали хорошее совпадение с расчетными значениями и со значениями, полученными для других приемных систем комплекса «Квазар-КВО». Разработанная приемная система готова к размещению на радиотелескопе РТ-4 и проведению РСДБ-наблюдений.

3.4 Выводы

В соответствии с ранее сформулированными требованиями разработаны и реализованы приемная система с криогенным охлаждением, включающая облучатель (конический рупор) и входной СВЧ-тракт, для радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции. Осуществлены измерения основных параметров разработанной приемной системы, которые приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6. Основные параметры разработанной приемной системы.

Параметр	Значение	
Поляризация	RCP	LCP
Диапазон принимаемых частот	8.2–9.1 ГГц	8.2–9.1 ГГц
Диапазон выходных частот	0.1–1.0 ГГц	0.1–1.0 ГГц
Ширина диаграммы направленности облучателя по уровню –10 дБ	51–54°	51–54°
Коэффициент эллиптичности	≤1 дБ	
Шумовая температура приемной системы (без облучателя и СВЧ-тракта)	15 К	14 К
Шумовая температура приемной системы (без облучателя)	26 К	25 К
Коэффициент усиления приемной системы	62 дБ	60 дБ
Неравномерность коэффициента усиления	<3 дБ	<3 дБ
Точка компрессии приемной системы P_{1dB}	–57 дБм	–63 дБм
Динамический диапазон (в полосе 1 Гц)	116 дБ	110 дБ
Динамический диапазон, свободный от гармоник входного сигнала (в полосе 1 Гц)	88 дБ	80 дБ

Результаты проведенных измерений и исследований параметров созданной приемной системы позволяют использовать ее на радиотелескопе РТ-4 передвижной РСДБ-станции в режиме совместных наблюдений с комплексом «Квазар-КВО».

Разработанная приемная система готова к проведению радиометрических и радиоинтерферометрических наблюдений в составе радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции.

Глава 4. Первые наблюдения на радиотелескопе РТ-4 передвижной РСДБ-станции

Пожалуй, главными критериями оценки для разработанной приемной системы являются результаты совместных РСДБ-наблюдений с комплексом «Квазар-КВО» и определение координат передвижной РСДБ-станции посредством РСДБ-наблюдений. В данной главе представлены результаты наблюдений на радиотелескопе РТ-4 передвижной РСДБ-станции, находящейся на территории радиоастрономической обсерватории «Светлое». Для осуществления успешных РСДБ-наблюдений совместно с комплексом «Квазар-КВО» необходимо оценить характеристики радиотелескопа РТ-4 и правильно спланировать наблюдения с учетом характеристик и особенностей углов наведения радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции. Как было указано в параграфе 1.2 для правильного выбора радиоисточников, а, следовательно, наблюдательной программы необходимо определить величину *SEFD* радиотелескопа РТ-4. Таким образом, до проведения РСДБ-наблюдений на радиотелескопе РТ-4 передвижной РСДБ-станции необходимо:

– Провести измерения шумовой температуры приемной системы с облучателем и волноводным СВЧ-трактом на радиотелескопе РТ-4. Определить значения калибровок для последующих радиометрических наблюдений.

– Провести фокусировку по эталонному радиоисточнику и измерить ширину диаграммы направленности, а также определить значения шумовой температуры системы $T_{\text{сис}}$ и *КИП* радиотелескопа.

– Выбрать список радиоисточников с учетом характеристик радиотелескопа РТ-4 с созданной ПС и других радиотелескопов принимающих участие в наблюдениях. Оценить необходимое время сопровождения источника, то есть время накопления сигнала необходимое, для каждого источника с учетом его потока.

4.1 Измерение шумовой температуры новой приемной системы радиотелескопа РТ-4

Измерения шумовой температуры разработанной приемной системы на радиотелескопе РТ-4 проводились на основе методики, описанной в параграфе 3.1. Особенностью данных измерений является наличие облучателя на входе приемной системы и как, следствие, невозможность использования низкотемпературного генератора шума (НГШ), как в предыдущем исследовании. Кроме того дополнительной сложностью измерений является необходимость их проведения при направлении радиотелескопа в горизонт. Схема эксперимента по измерению шумовой температуры приемной системы на радиотелескопе РТ-4 представлена на рисунке 4.1.

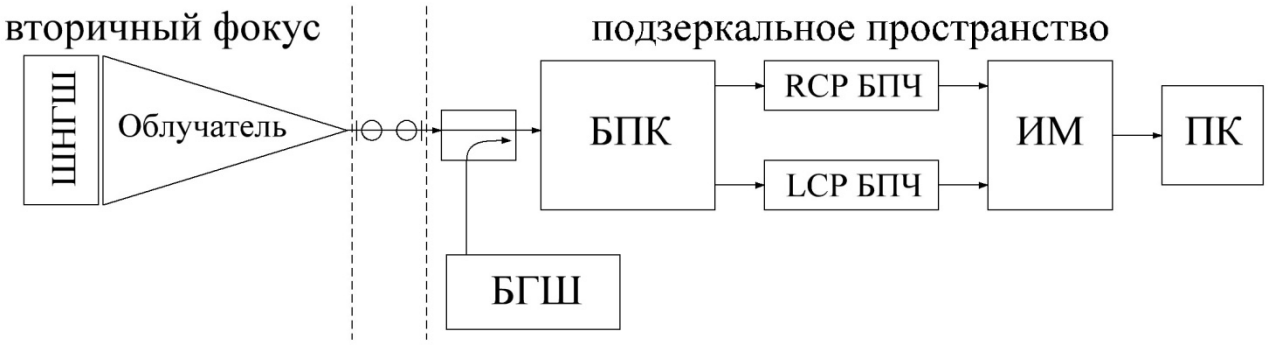


Рисунок 4.1. Схема измерения шумовой температуры и значения амплитудной калибровки на радиотелескопе РТ-4.

Как и в предыдущих измерениях шумовой температуры (см. параграф 3.1) данный эксперимент основывается на методе двух отсчетов, однако в данном случае источником шумового сигнала не может быть НГШ, использованный ранее, так как на входе системы облучатель. Таким образом, специально для данного эксперимента был разработан и изготовлен широкоапертурный низкотемпературный генератор шума (ШНГШ), который на время измерений устанавливается на вход облучателя во вторичном фокусе радиотелескопа РТ-4. Измеритель мощности (ИМ) Agilent N1914A, детекторы мощности 8487D и персональный компьютер (ПК) для регистрации данных располагались в антенном контейнере.

На рисунке 4.2. представлена конструкция ШНГШ (вид сверху в продольном разрезе). Он представляет собой экранированную тонким слоем жести (4) емкость для жидкого азота (1), изготовленную из пенопласта. Диаметр полости для азота 110 мм, глубина — 80 мм. Внутрь полости помещен радиопоглощающий материал (РПМ) «Мох–П-70». В передней его части расположено радиопрозрачное окно (3) диаметром 110 мм, соответствующее диаметру фокального контейнера РТ-4.

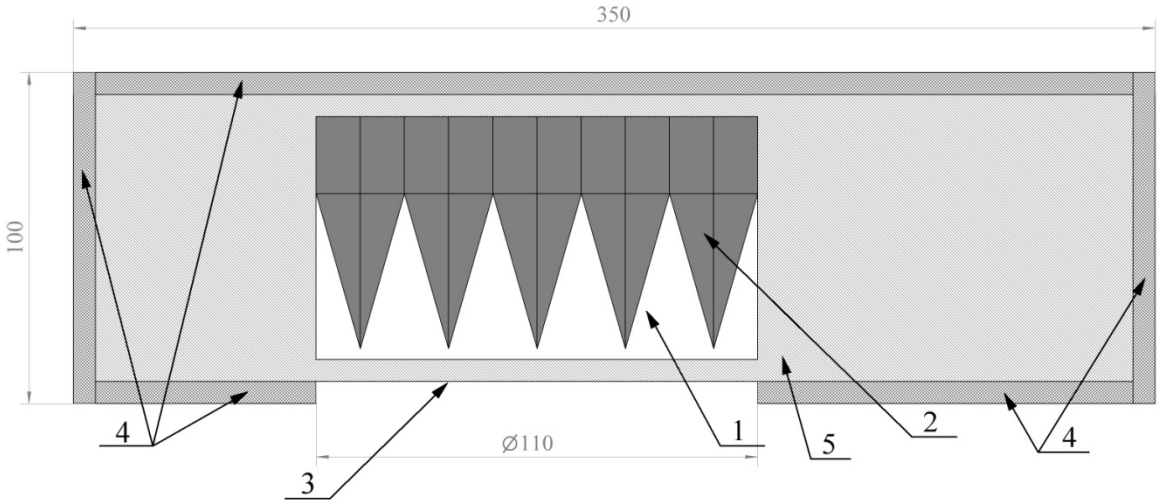


Рисунок 4.2. Широкоапертурный низкотемпературный генератор шума. 1 — емкость для азота; 2 — радиопоглощающий материал; 3 — радиопрозрачное окно; 4 — радиочастотный металлический экран; 5 — пенопласт.

В процессе измерений шумовой температуры приемной системы РТ-4, облучатель расположен горизонтально во вторичном фокусе антенны РТ-4. ШНГШ устанавливался между конррефлектором и облучателем таким образом, чтобы его радиопрозрачное окно совпало с окном фокального контейнера (Рисунок 4.3).

Шумовая температура ШНГШ с азотом определялась калибровкой по измеренным с помощью НГШ шумовой температуре и амплитудной калибровке приемной системы в лаборатории и составила 85 К. Физическая температура «теплого» ШНГШ измеряется на поверхности поглотителя с помощью инфракрасного измерителя температуры Fluke 62 mini.

Рисунок 4.3. ШНГШ установлен на радиотелескопе РТ-4 для измерения шумовой температуры приемной системы.

Как и при измерениях в лаборатории БПК был выведен на криогенный режим. Измерения проводились в 2 этапа (см. рисунок 4.4): в начале измерялась приемная система с теплым ШНГШ на входе облучателя приемной системы — уровень мощности $P_т$, подавались два уровня калибровки от БГШ $P_{кт}$ в течение 20–30 с, затем на вход приемной системы устанавливался холодный ШНГШ и измерения повторялись. Уровень $P_х$ соответствует мощности выходного сигнала ПС при установленном холодном ШНГШ, $P_{кх}$ — уровни сигнала калибровки при холодном ШНГШ на входе.

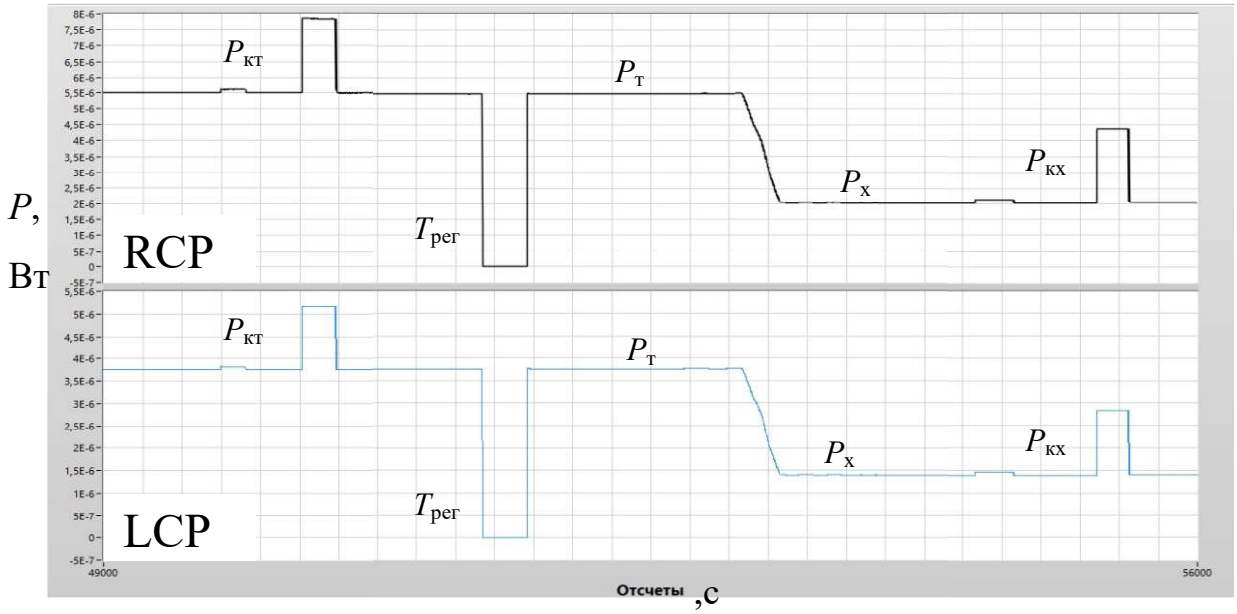


Рисунок 4.4. Выходной сигнал приемной системы РТ-4, фиксируемый измерителем мощности, при измерении шумовой температуры.

Измерения значений калибровок при теплом и холодном ШНГШ на входе приемной системы производились для контроля линейности тракта приемной системы. Значения калибровок, пересчитанные в единицы шумовой температуры (К) для разных ШНГШ различались меньше чем на 1%, что говорит о линейном режиме работы ПС при проведении измерений. Измеренные значения мощности сигналов, калибровок, а так же значения температуры ШНГШ приведены в таблице 4.1. Были проведены несколько итераций измерений шумовой температуры с использованием разных каналов измерителя мощности. Уровень $T_{рег}$ соответствует собственным шумам измерителя мощности, когда при измерениях приемная система была отключена. Уровень $T_{рег}$ пренебрежимо мал тем не менее был включен в расчет шумовой температуры согласно (3.5). Для удобства дальнейшего использования амплитудных калибровок было принято решение использовать меньшие из них (в Таблице 4.1 приведены значения уровней мощности для них). Стоит отметить, что измерения шумовой температуры ПС $T_{пс}$ проводились в разные дни в течение месяца, при этом физическая температура РПМ ШНГШ — $T_{фт}$ изменялась в диапазоне 15–30°С, результаты измерений на радиотелескопе РТ-4 приведены в Таблице 4.1.

Таблица 4.1. Значения параметров приемной системы при измерении шумовой температуры на радиотелескопе РТ-4.

Канал	$T_{фт}$, °С	Тем-ра теплой нагрузки T_{300}, К	Тем-ра холодной нагрузки $T_{а}$, К	Мощность при теплой нагрузке $P_{т}$, мкВт	Калиб-ка при теплой нагрузке $P_{кт}$, мкВт	Мощность при холодной нагрузке $P_{х}$, мкВт	Калиб-ка при холодной нагрузке $P_{кх}$, Вт	Рт/Рх n	Измер. $T_{пс}$, К	Измер. $T_{к}$, К
RCP	20	293.0	85.0	5.5	5.6	2.0	2.1	2.69	37.0	5.5
LCP	20	293.0	85.0	3.8	3.8	1.4	1.5	2.70	36.0	5.1

По результатам измерений шумовая температура разработанной приемной системы в канале правой поляризации (RCP) составила порядка 37 К в канале левой поляризации (LCP) — 36 К. Отличие шумовой температуры в каналах разной

поляризации минимально, но повторяется для разных каналов регистрации, стоит отметить, что соответствующая разница между значениями шумовой температуры для этих каналов присутствовала при измерениях в лаборатории (см. таблицу 3.1). Данные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Проведенное трехмерное моделирование, разработанная конструкция размещения приемной системы и доработка конструкции подзеркального пространства позволили разметить всю аппаратуру приемной системы и сохранить характеристики, полученные в лабораторных условиях. Приемная система смонтирована на радиотелескопе РТ-4.

2. Полученные результаты шумовой температуры совпадают с теоретическими расчетами, представленными в таблице 2.1 и результатами, полученными в лаборатории. Согласно теоретическому расчету значение шумовой температуры ПС $T_{пс}$=35 К, измеренное значение $T_{пс}$=36–37 К.

3. Данные результаты позволяют сделать вывод, что радиотелескоп РТ-4 с разработанной приемной системой готов к радиометрическим наблюдениям. Необходимо провести фокусировку и оценить параметры радиотелескопа: шумовую температуру системы $T_{сис}$ и *КИП*. После чего можно готовить прототип передвижной РСДБ-станции к радиоинтерферометрическим наблюдениям.

4.2 Наблюдения на радиотелескопе РТ-4 в радиометрическом режиме

До проведения радиометрических наблюдений необходимо провести фокусировку радиотелескопа и убедиться в правильности установки облучателя во вторичном фокусе радиотелескопа РТ-4. Для этого необходимо выйти на точечный радиоисточник, обладающий достаточно большим потоком радиоизлучения.

Обычно при измерении параметров и фокусировке радиотелескопов РТ-13 и РТ-32 используются радиоисточники Кассиопея А и Венера, но как было указано в таблице 1.9 радиотелескоп РТ-4 имеет ограниченный сектор обзора по азимуту от 140° до 220°, по углу места от 0° до 80°. Это необходимо учитывать при планировании в том числе радиометрических наблюдений. Кассиопея А и Венера

при подготовке к измерениям были не доступны, однако радиоисточник Лебедь А с потоком 162 Ян в *X*-диапазоне отлично подходит для данных измерений. Стоит отметить, что значение потока для источника определено из работы [68] с учетом угловых размеров источника, ширины диаграммы направленности РТ-4 и поглощения радиоизлучения в атмосфере по методике, описанной в работе [69].

На рисунках 4.5–4.6 представлены записи сканирования радиоисточника Лебедь А по углу места и азимуту, положение радиоисточника по углу места на момент измерений составляло приблизительно 70°. Одновременно регистрировались оба канала приемной системы. В качестве системы регистрации в данных измерениях выступал измеритель мощности Agilent N1914A с детекторами мощности 8487D. По этим записям определены значения ширины диаграммы направленности (ДН) радиотелескопа по уровню половинной мощности. Ширина ДН в вертикальной плоскости составляет 0.56° для правой и левой поляризации. Значение ширины ДН РТ-4 в горизонтальной плоскости составило 0.58°.

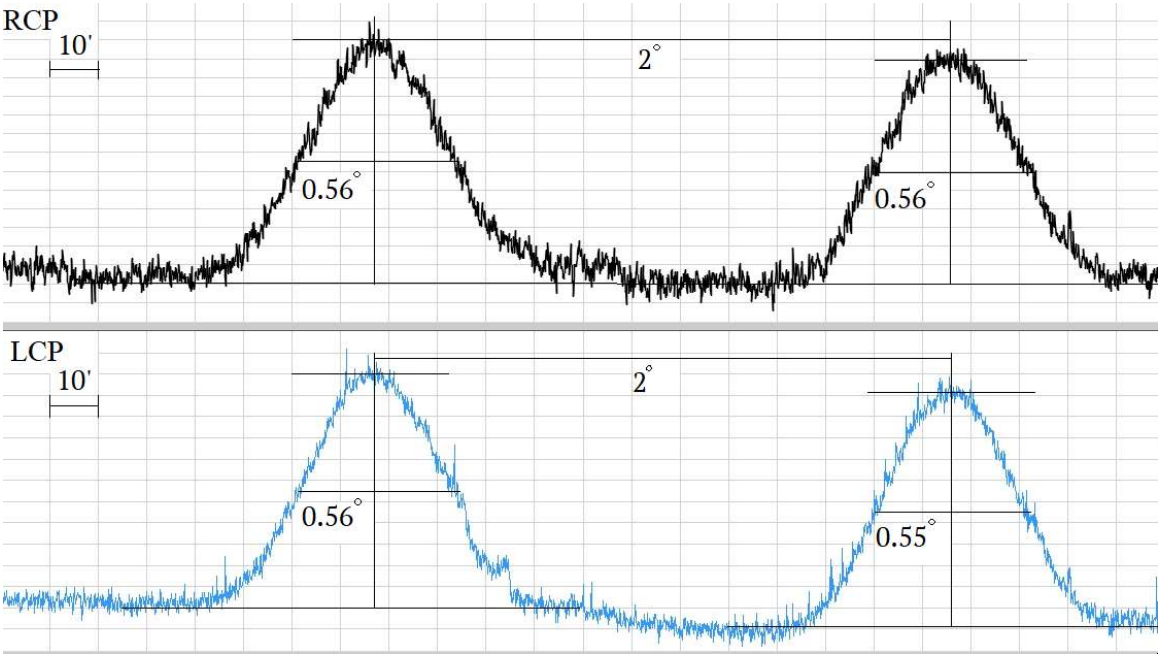


Рисунок 4.5. Запись сканирования по углу места радиоисточника Лебедь А.

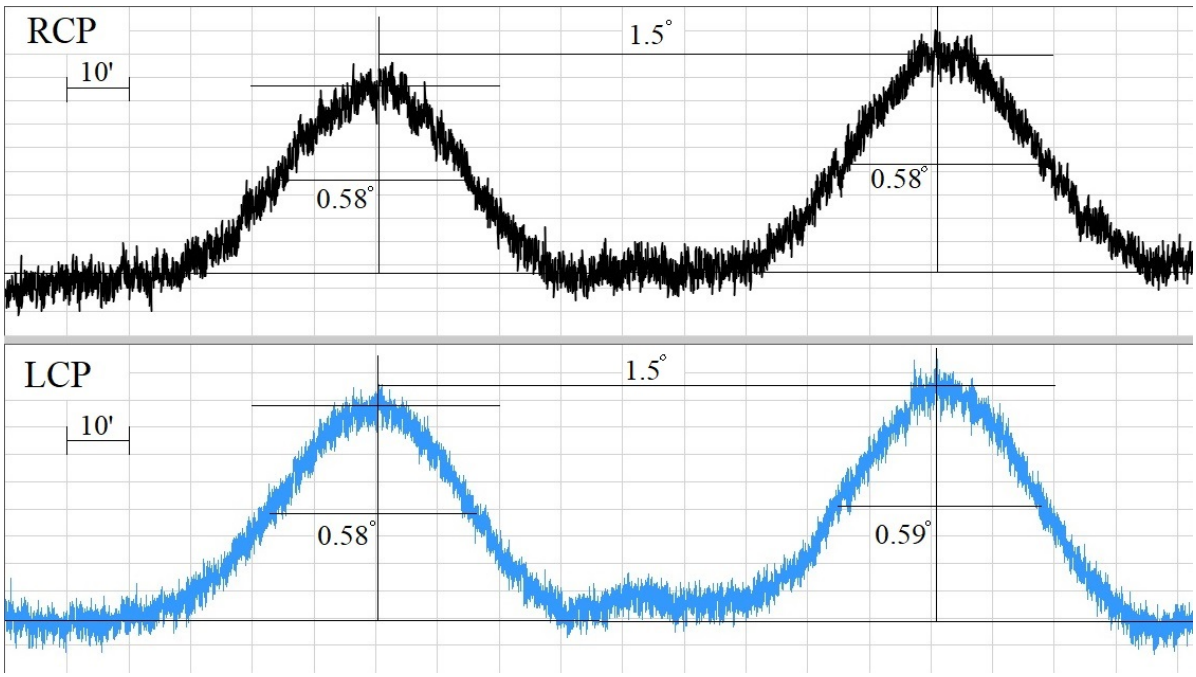


Рисунок 4.6. Запись сканирования по азимуту радиоисточника Лебедь А.

Полученные значения ширины ДН соответствуют расчетным, фазовый центр облучателя при монтаже приемной системы верно совмещен с вторичным фокусом антенны радиотелескопа РТ-4. Представленные сканы показывают, что радиотелескоп сфокусирован, поправки наведения определены верно. Таким образом, можно приступать к измерениям параметров радиотелескопа.

На рисунке 4.7 представлены измерения параметров радиотелескопа РТ-4 по радиоисточнику Лебедь А. Шумовая температура системы — $T_{\text{сис}}$, определялась сравнением выходного сигнала приемной системы при включенном и выключенном сигнале амплитудной калибровки. Для учета шумовой температуры антенны в направлении источника измерения $T_{\text{сис}}$ проводились непосредственно на источнике при измерении *SEFD,* таким образом:

$$T_{\text{сис}} = \frac{T_{\text{к}} \cdot P_{\text{небо}}}{P_{\text{к}}}, \tag{4.1}$$

где $P_{\text{к}}$ — приращение мощности принимаемого сигнала при включении амплитудной калибровки; $T_{\text{к}}$ — значение амплитудной калибровки в Кельвинах, полученное при азотных измерениях (свое для каждого из каналов приемной системы); $P_{\text{небо}}$ — уровень мощности неба (принимаемый вне источника).

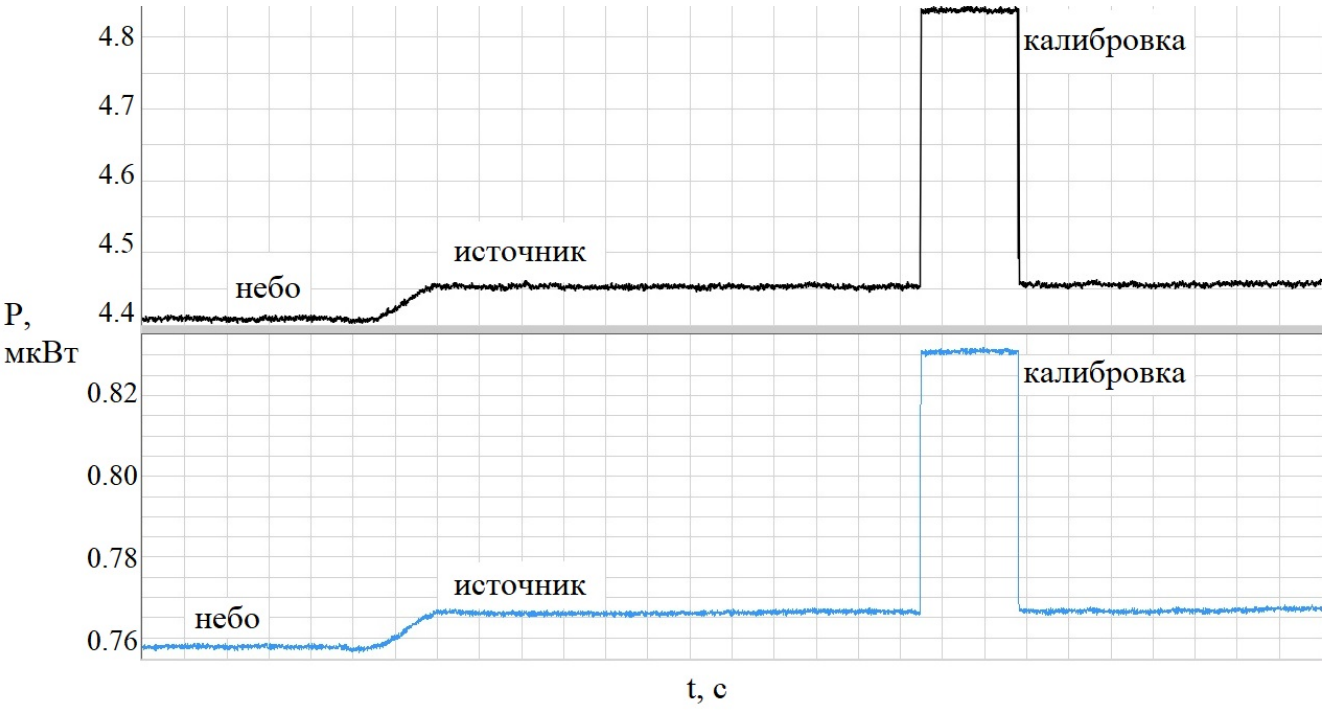


Рисунок 4.7. Измерение параметров радиотелескопа РТ-4. Источник Лебедь А.

Значение *SEFD* определялось по известной формуле:

$$SEFD = \frac{F \cdot P_{\text{небо}}}{P_{\text{ист}}}, \tag{4.2}$$

где $P_{\text{ист}}$ — приращение мощности принимаемого сигнала при наведении на источник; F— значение потока источника в Янских; $P_{\text{небо}}$ — уровень мощности неба (принимаемый вне источника с учетом вклада системы регистрации).

Значения коэффициента использования поверхности (*КИП*) исходя из (1.3) определяются по следующей формуле:

$$\text{КИП} = 2k\frac{T_{\text{сис}}}{SEFD \cdot A_{\text{геом}}}, \tag{4.3}$$

где $A_{\text{геом}}$ — площадь апертуры радиотелескопа; k— постоянная Больцмана. Результаты радиометрических измерений приведены в таблице 5.2.

Расчетная шумовая температура антенны РТ-4 в идеальных условиях, учитывая модель атмосферы [39], составляет 16 К. Однако оценка приведенная в параграфе 2.2 показала, что перелив за кромки конррефлектора составляет значение порядка 10%, это привело к увеличению шумовой температуры антенны до 19–20 К и как следствие измеренное значение $T_{\text{сис}}$=55 К.

Таблица 5.2. Результаты радиометрических измерений на радиотелескопе РТ-4.

Характеристика	RCP	LCP
$T_к$	5.5 К	5.1 К
$T_{сис}$	57 К	55 К
SEFD	17000 Ян	16000 Ян
КИП	0.65	0.65
Ширина ДН по уровню –3 дБ	УМ–0.56° АЗ–0.58°	УМ–0.56° АЗ–0.58°

Исходя из полученных значений $T_{сис}$ и с учетом характеристик установленной на РТ-4 системы регистрации (СШПС) можно оценить флуктуационную чувствительность приемной системы:

$$\Delta T_{мин} = \frac{\alpha \cdot T_{сис}}{\sqrt{\Delta f \cdot t}}, \tag{4.4}$$

где t — время накопления выходного сигнала, α — коэффициент, зависящий от схемы радиометра, α=$\sqrt{2}$ для данной приемной системы.

Так полоса регистрации Δf для СШПС составляет 512 МГц, время накопления τ будем считать равным 60 секундам. Чувствительность $\Delta T_{мин}$ в таком случае будет порядка 0.5 мК для обоих каналов приемной системы.

Особенности системы облучения и изменение конструкции подзеркального пространства ожидаемо не повлияли на *КИП*, удалось добиться максимально возможных для данной антенной системы параметров в *X*-диапазоне. Так значение *КИП*=0.65 соответствует расчетному значению для данной антенной системы в *X*-диапазоне длин волн. Полученные значения *SEFD* соответствуют ожидаемым с учетом примененных решений при разработке приемной системы. В целом, согласно, предложенной в параграфе 1.4 оценке возможности использования малых радиотелескопов в РСДБ-наблюдениях, можно сделать вывод, что радиотелескоп РТ-4, оснащенный созданной приемной системой, готов к успешным радиоинтерферометрическим наблюдениям с радиотелескопами РТ-13 комплекса «Квазар-КВО».

4.3 Результаты первых РСДБ-наблюдений

В рамках проведения первых РСДБ-наблюдений с участием радиотелескопа РТ-4 передвижной РСДБ-станции было принято решение задействовать радиотелескопы РТ-13 и РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» [70].

Система регистрации, установленная на РТ-4 принимает сигналы с шириной полосы пропускания отдельных каналов 512 МГц и преобразует их в двухбитовые последовательности со скоростью потока данных 2 Гбит/с. РТ-13 оборудована широкополосной системой регистрации [46], $SEFD_x$ составляет 1000 Ян, поток данных от одного канала 2 Гбит/с. Система регистрации на РТ-32 была настроена для записи 8 последовательных частотных каналов с шириной полосы пропускания отдельного канала 32 МГц с двухбитовым квантованием сигнала, суммарная полоса пропускания — 1 Гбит/с, $SEFD_x$ РТ-32 составляет 350 Ян.

Для определения минимального отношения сигнал-шум и, как следствие, минимальных потоков источников пригодных для проведения наблюдений преобразуем выражение (1.5), отношение сигнал-шум (*SNR*) может быть вычислено:

$$SNR = \eta F \sqrt{\frac{2\Delta f t}{SEFD_1 SEFD_2}}, \tag{4.5}$$

где η — коэффициент потерь из-за квантования принимаемого радиосигнала (η = 0.88 для двухбитового квантования), F — плотность потока излучения от источника, Δf — ширина полосы регистрируемого частотного диапазона, t — длительность наблюдения. Необходимое время для детектирования источника выбирается исходя из его яркости и требуемого *SNR*. При постпроцессорной обработке РСДБ-данных *SNR*=7 считается минимально допустимым значением для достоверного обнаружения сигнала от радиоисточника. Таким образом, источники с плотностью потока излучения 138 мЯн и 115 мЯн для баз РТ-4 с РТ-13 и РТ-32, соответственно, являются минимально различимыми при времени накопления 60 секунд.

11 сентября 2018 г. проведен РСДБ-сеанс Ru-TEST763 — первые наблюдения с участием радиотелескопа РТ-4 в обсерватории «Светлое», РТ-13 в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская», и РТ-32 в «Зеленчукской». Длительность наблюдений составила 10 минут, наблюдался источник 3С454.3 с плотностью потока излучения около 7 Ян. Обработка РСДБ-данных, полученных для РТ-4, выполнялась с использованием программных корреляторов RASFX [66] и DiFX [71, 72]. На корреляторе RASFX в полосе частот от 8592 до 9104 МГц были получены кросскорреляционные отклики для баз РТ-4 в обсерватории «Светлое» с РТ-13 в обсерваториях «Зеленчукская» и «Бадары». Изображения откликов приведены на рисунках 4.8–4.9. На базе РТ-13 «Бадары-Зеленчукская» *SNR* составил 3520, на базах РТ-4–РТ-13 «Светлое–Бадары» и «Светлое–Зеленчукская» — 230 и 267, соответственно. Оценки *SNR* из наблюдений меньше теоретических, что можно объяснить тем, что источник частично разрешается и коррелированный поток получается меньше. Результаты первых тестовых наблюдений позволили перейти к многочасовым РСДБ-наблюдениям.

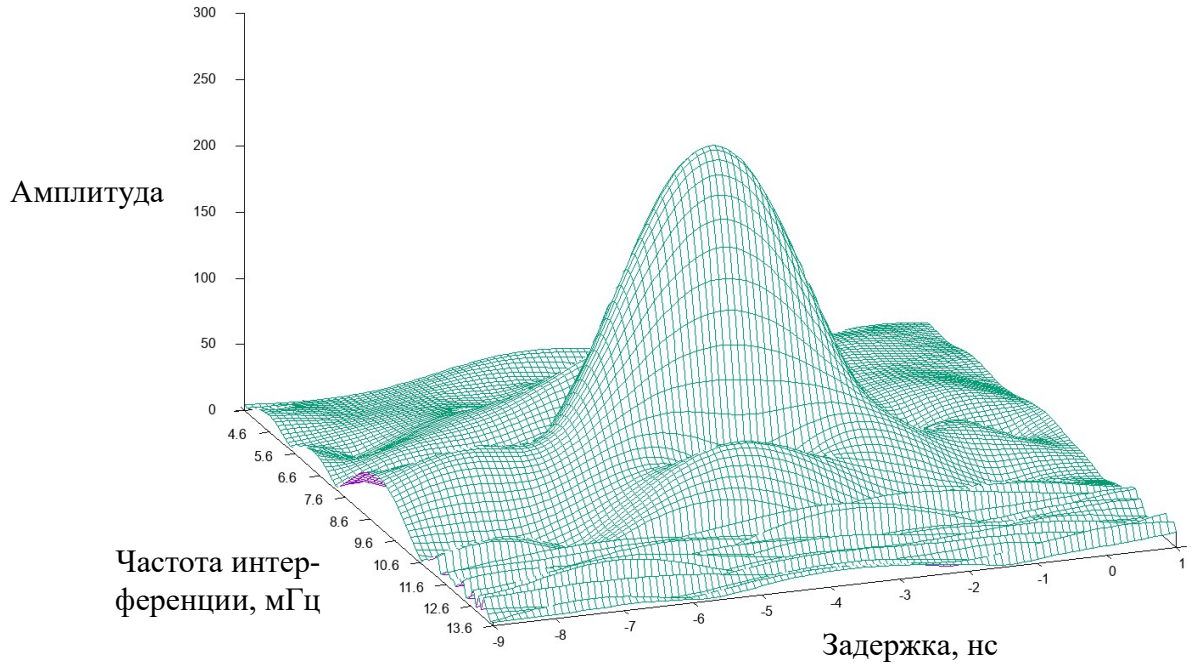


Рисунок 4.8. Корреляционный отклик радиотелескопа РТ-4 «Светлое» с радиотелескопом РТ-13 в обсерватории «Бадары».

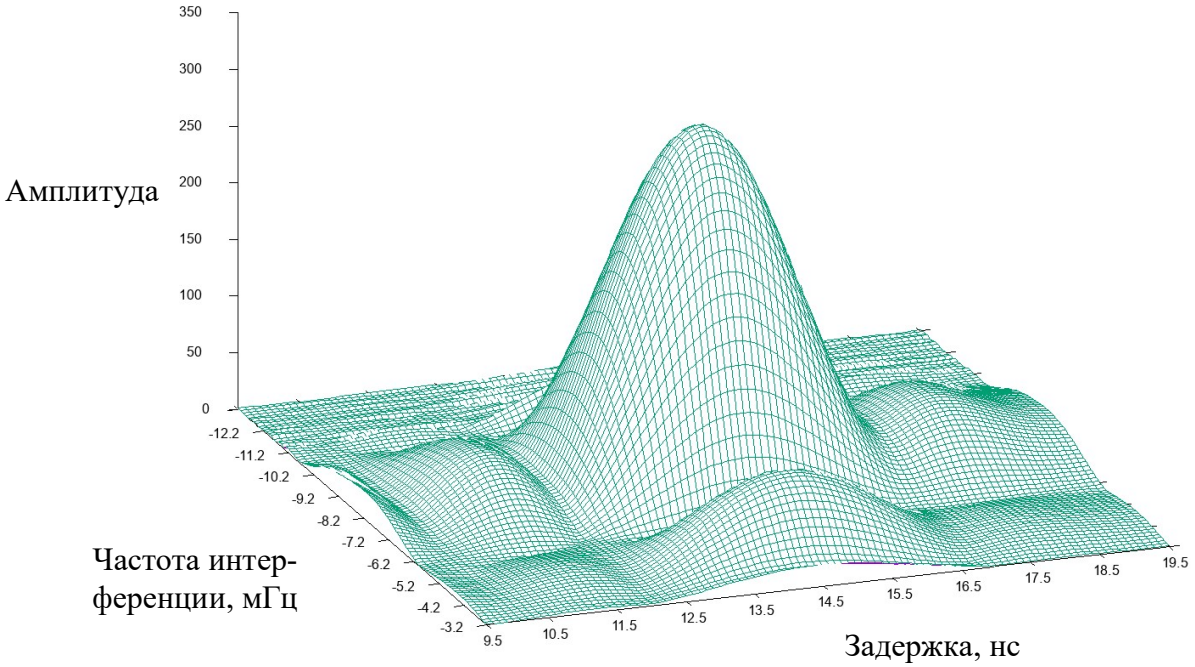


Рисунок 4.9. Корреляционный отклик радиотелескопа РТ-4 «Светлое» с радиотелескопом РТ-13 в обсерватории «Зеленчукская».

1 и 22 ноября 2018 года были проведены полноценные геодезические 4-х и 5-ти часовые РСДБ-сеансы наблюдений с участием РТ-4 в «Светлом» для уточнения его координат. 1-го ноября в наблюдениях также приняли участие РТ-13 в обсерваториях «Бадары» и «Зеленчукская», в сеансе 22-го ноября — 6 радиотелескопов: РТ-4 «Светлое», РТ-13 «Бадары» и «Зеленчукская» и РТ-32 «Светлое», «Бадары», «Зеленчукская». На РТ-4 регистрировались данные от одного канала в *X*-диапазоне в двух круговых поляризациях с шириной полосы пропускания 512 МГц. На РТ-13 регистрировались данные в *S*- и *X*-диапазонах, по одному каналу с шириной полосы пропускания 512 МГц в правой круговой поляризации. На РТ-32 регистрировалось 8 частотных каналов в *S*- и *X*-диапазонах с шириной полосы 32 МГц (суммарная полоса в каждом диапазоне — 256 МГц) в правой круговой поляризации.

РСДБ-данные обрабатывались на корреляторах RASFX и DiFX, вычислялись авто- и кросскорреляционные спектры с разрешением 0.25 МГц (2048 спектральных каналов) и периодом накопления 1/16 с на корреляторе RASFX и 0.5 МГц и 0.5 с на корреляторе DiFX. Для вычисления первоначальной эфемерид-

ной модели использовались координаты радиотелескопа РТ-4, полученные из геодезических измерений на местности. Для вычисления групповой задержки использовались пакет WOPS (для коррелятора RASFX) и пакет PIMA (для коррелятора DiFX). При вычислении ионосферной задержки для РТ-4 использовались данные, полученные из глобальных карт TEC по данным Международной ГНСС службы на дату РСДБ-наблюдений. По вычисленным полным групповым и ионосферным задержкам, их формальным ошибкам и с учетом логов метеоданных были сформированы выходные файлы стандарта NGS, которые были переданы в пакет вторичной обработки «Квазар» [73] для уточнения координат радиотелескопа.

В пакете вторичной обработки «Квазар» обрабатывались NGS-файлы по трем станциям 181101ny.ngs (73 наблюдения) и 181122ny.ngs (78 наблюдений), полученные после обработки в программном пакете PIMA. Целью обработки было уточнение координат антенны РТ-4. Координаты оценивались по двум сеансам независимо и по совместной обработке двух сеансов. При совместной обработке, глобальными параметрами были координаты РТ-4, локальными параметрами были тропосферная задержка в зените, линейный ход рассинхронизации часов.

Координаты по геодезическим измерениям и уточненные в результате совместного уравнивания по РСДБ-сеансам (с формальными ошибками) приведены в таблице 4.3. С учетом того, что длительность проведенных РСДБ-наблюдений составляет единицы часов, а сам радиотелескоп РТ-4 имеет ограниченный сектор вращения антенны и низкую скорость движения антенны, за счет увеличения количества наблюдений в несколько раз точность вычислений координат на суточном сеансе может быть улучшена до 1 см.

Таблица 4.3. Координаты РТ-4 определенные по РСДБ-наблюдениям.

Координата	РСДБ-наблюдения	
	Значение, м	Формальная ошибка, м
X	2730187.56	0.08
Y	1562518.72	0.03
Z	5529916.09	0.06

4.4 Выводы

Проведенные исследования показали, что оснащение радиотелескопа РТ-4, являющегося прототипом передвижной РСДБ-станции, разработанной приемной системой с криогенным охлаждением позволило провести успешные радиометрические и радиоинтерферометрические наблюдения. Данные результаты позволяют говорить об успешном применении концепции «мобильных/передвижных» РСДБ-станций и о возможности применения передвижных РСДБ-станций в ограниченных и труднодоступных регионах совместно с только одной фундаментальной станцией комплекса «Квазар-КВО». Первые наблюдения позволили получить трехмерные координаты передвижной станции с точностью 10 см.

Для сравнения с мировым уровнем в таблице 4.4. представлены основные характеристики систем радиотелескоп-радиометр для передвижных РСДБ-станций и прототипа передвижной РСДБ-станции РТ-4 с разработанной приемной системой. Следует отменить, что в силу специфики представленных передвижных станций, их антенны имеют разные облучательные системы и разный вклад от переоблучения в шумовую температуру системы, а в некоторых случаях — и разные диапазоны принимаемых частот. С учетом отношения диаметров антенн станция РТ-4 соответствует параметрам станции TIGO и превосходит остальные. Однако стоит отметить, что станции MARBLE используют широкополосные приемные системы без криогенного охлаждения.

Значение шумовой температуры системы $T_{сис}$=55 К можно считать хорошим результатом для радиотелескопа передвижной РСДБ-станции, учитывая, что схожая по концепции антенна TIGO с диаметром зеркала 6 м обладает значением $T_{сис}$=65 К. Определенная из радиометрических наблюдений величина параметра *SEFD* радиотелескопа РТ-4 составила 16000–18000 Ян в зависимости от угла места и погодных условий.

Таблица 4.4. Характеристики антенн передвижных РСДБ-станций.

Станция	$D_а$, м	*SEFD,* Ян	*КИП*	$T_{сис}$, К	$T_{пс}$, К	Δf, ГГц
ORION MV-3	5	40000	0.4–0.5	130	24	8.2–8.6
TIGO	6	7700	0.8	65	45	8.1–8.9
CARAVAN2400	2.4	$2 \cdot 10^5$	0.4	130	80	8.2–8.6
MARBLE1	1.6	$1–2 \cdot 10^6$	0.10–0.15	200–300	65–70	3–11
MARBLE2	2.4	$2–4 \cdot 10^5$	0.3–0.4	150–200	65–70	3–11
РТ-4	4.3	16000–18000	0.65	55–57	37	8.2–9.1

Таким образом, полученные характеристики радиотелескопа РТ-4 — прототипа передвижной РСДБ-станции — вполне соответствуют лучшим зарубежным аналогам.

Заключение

Разработанная для передвижной РСДБ-станции приемная система *X*-диапазона частот с криогенным охлаждением первых каскадов усиления микрокриогенной системой замкнутого цикла удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к передвижной РСДБ-станции для ее полноценного включения в состав комплекса «Квазар-КВО», что позволит дополнительно расширить возможности комплекса в части решения задач астрофизики и космической геодезии. Созданная приемная система обладает практически предельными характеристиками для компактной антенны передвижной РСДБ-станции и является, по мнению автора, уникальным инструментом для радиоастрономических исследований.

В результате проведенной работы удалось добиться значения шумовой температуры приемной системы без СВЧ-тракта и облучателя менее 15 К. Это значение соответствует уровню шумовой температуры аналогичных приемных систем применяемых на радиотелескопах большого размера в мировой практике РСДБ, и значительно превосходит параметры для передвижных станций.

Успешный опыт эксплуатации приемной системы на радиотелескопе РТ-4 в обсерватории «Светлое» показал правильность заложенных при проектировании технических решений. Впервые в РФ получены научные результаты с применением передвижной РСДБ-станции и доказана возможность их использования в геодезических целях там, где нет возможности использовать обычные РСДБ-системы.

Уникальность конструкции разработанной приемной системы позволила достигнуть практически предельных для компактных антенн передвижных РСДБ-станций параметров. Шумовая температура системы $T_{сис}$=55–57 К при *КИП*=0.65 и чувствительность порядка 0.5 мК позволяют радиотелескопу РТ-4, оснащенному данной приемной системой, работать не только в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», но и проводить радиометрические измерения. В ходе работы на основе существующих методик испытаний и исследований радиоастрономиче-

ских приемных систем для подтверждения полученных характеристик разработаны методики испытаний созданной приемной системы.

В заключение автор хотел бы выразить признательность своему научному руководителю Д. В. Иванову за всестороннюю помощь в научной работе. Автор выражает благодарность А. В. Ипатову за ценные замечания и полезные советы по содержанию. Я благодарен моим коллегам Е. Ю. Хвостову и И. А. Позднякову за помощь в проведении экспериментов, В. К. Чернову и Ю. В. Векшину за полезные научные дискуссии и интерес к моей работе, Д. А. Маршалову и В О. Кену за помощь в оформлении настоящей работы. И, конечно же, я благодарен моей семье за понимание и поддержку.

Список сокращений и условных обозначений

Обозначения

$A_{\text{геом}}$ — площадь апертуры радиотелескопа,

КИП — коэффициент использования поверхности,

G — коэффициент усиления,

F — поток источника,

IP_3 — уровень входного сигнала по входу, характеризующий интермодуляционные искажения третьего порядка,

Ka — обозначение диапазона частот 28–34 ГГц,

$K_э$ — коэффициент осевой эллиптичности,

$P_{1дБ}$ — точка компрессии по уровню минус 1 дБ,

S — обозначение диапазона частот 2.2–2.6 ГГц,

SEFD — эквивалентная плотность потока системы,

SNR — отношение сигнал-шум,

$T_а$ — шумовая температура антенны,

$T_{пр}$ — шумовая температура приемника,

$T_{пс}$ — шумовая температура приемной системы,

$T_{сис}$ — шумовая температура системы радиотелескоп-радиометр,

X — обозначение диапазона частот 7.0–9.5 ГГц,

$\sigma_{\tau_з}$ — СКО измерения задержки,

Δf — рабочая полоса частот,

$\Delta T_{мин}$ — чувствительностью радиометра,

t — время накопления сигнала.

Сокращения

АЧХ — амплитудно-частотная характеристика,

БГШ — блок генераторов шума,

БПК — блок приемный криостатируемый,

БПЧ — блок преобразования частоты,

ГНСС — глобальные навигационные спутниковые системы,

ГПИ — генератор пикосекундных импульсов,

ДН — диаграмма направленности,

КВНО — координатно-временное и навигационное обеспечение,

КВП — коаксиально-волноводный переход,

КВСО — координатно-временная система отсчета,

КГС — космическая геодезическая сеть,

МКС — микрокриогенная система,

МШУ — малошумящий усилитель,

ПОЗ — параметры ориентации Земли,

ПС — приемная система,

ПЧ — промежуточная частота,

РПМ — радиопоглащющий материал,

РПС — радиоастрономическая приемная система,

РСДБ — радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами,

СВЧ — сверхвысокая частота,

СКО — среднеквадратическое отклонение,

СПШС — система преобразования широкополосных сигналов,

СЧВС — система частотно-временной синхронизации,

ШПК — широкополосный преобразовательный канал,

ШПС — широкополосная приемная система,

AGGO — Argentinean-German Geodetic Observatory,

ARIES — Astronomical Radio Interferometric Earth Surveying,

CARAVAN — Compact Antenna of Radio Astronomy VLBI Adapted for Network,

ICRF — International Celestial Reference Frame,

IERS — International Earth Rotation Service,

ITRF — International Terrestrial Reference Frame,

IVS — International VLBI Service,

EVN — European VLBI Network,

GGAO — Goddard Geophysical and Astronomical Observatory,

GPS — Global Positioning System,

LCP — левая круговая поляризация,

MARBLE — Multiple Antenna Radio-interferometer for Base Length Evaluation,

NICT — National Institute of Information and Communication Technology,

ORION — Operational Radio Interferometry Observation Network,

QRHA — Quad-Ridge Horn Antenna,

RCP — правая круговая поляризация,

TIGO — Transportable Integrated Geodetic Observatory,

VGOS — VLBI Global Observing System,

VLBA — Very Long Baseline Array,

VLBI — Very Long Baseline Interferometry.

Список литературы

Публикации автора по теме диссертации в изданиях, включенных в перечень ВАК

A1. *Евстигнеев А. А., Векшин Ю. В., Евстигнеева О. Г.,* ***Зотов М. Б****, Лавров А. С., Мардышкин В. В., Поздняков И. А., Хвостов Е. Ю., Шахнабиев И. В.* Широкополосная приемная система для РТ-13 обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2018. – Вып. 46. – С. 50–56.

A2. *Евстигнеева О. Г., Векшин Ю. В., Евстигнеев А. А. ,* ***Зотов М.Б.****, Ипатова И.А., Лавров А. С., Мардышкин В. В., Поздняков И. А., Хвостов Е. Ю.* СВЧ-блоки широкополосной приемной системы для РТ-13 обсерватории «Светлое» // Труды ИПА РАН. — 2018. — Вып. 46. — С. 132–138.

A3. *Векшин Ю. В.,* ***Зотов М. Б.****, Лавров А. С.* Устройство контроля параметров радиоастрономических приемников S/X-диапазонов // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2019. – Вып. 51. — С. 32–41.

A4. *Векшин Ю. В., Царук А. А. Вытнов А. В.,* ***Зотов М Б.****, Карпичев А. С., Хвостов Е.Ю.* Применение волоконно-оптических линий передачи в радиоастрономических приемных устройствах // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2019. – Вып. 50. — С. 16–22.

A5. ***Зотов М. Б.****, Иванов Д. В., Поздняков И. А., Хвостов Е. Ю., Чернов В. К.* Двухканальная приемная система X-диапазона для макета радиотелескопа РТ-4 // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2019. – Вып. 48. – С. 50–55.

Публикации автора по теме диссертации в изданиях, включенных в международную реферативную базу Scopus

A6. *V. Ken, Y. Vekshin, V. Chernov, A. Evstigneev, E. Khvostov,* ***M. Zotov****.* Analysis of VLBI Interferometer Characteristics Using Zero-baseline Lab Prototype and RASFX Correlator // PoS(EVN2018)142. — 2019. — Vol. 344, 142.

A7. ***M. B. Zotov**, D. V. Ivanov, V. Yu. Bikov, S. A. Grenkov, I. A. Pozdnyakov, I. A. Rahimov,V. G. Stempkovsky, A. A. Tsaruk, V. K. Chernov, I. V. Shakhnabiev, and A. M. Shishikin* The Results of the Developmentof the Mobile VLBI Station Prototype // Instruments and Experimental Techniques, 2020, Vol. 63, No. 6, pp. 864–869.

Публикации автора по теме диссертации в других научных изданиях

A8. ***Зотов М.Б.**, Иванов С. И., Лавров А. П.* Динамический диапазон широкополосного детектора СВЧ мощности на низкобарьерном диоде Шоттки с нулевым смещением // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы международной научно-практической конференции – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та — 2012 – С.6–7.

A9. ***Зотов М.Б.*** Разработка аппаратной платформы приемного комплекса крупнейшего в России полноповоротного радиотелескопа РТ-70 (г. Уссурийск) // XIX Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов— 2014 — С. 177

A10.***Зотов М.Б.**, Мардышкин В.В., Роев А.А*. Разработка проекта аппаратной платформы приемного комплекса радиотелескопа РТ-70 (г. Уссурийск) для режима совместных наблюдений в РСДБ-сети «Квазар-КВО» // Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт физики, наноэлектроники и телекоммуникаций СПБГПУ. Ч. 1. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. – С.8–11.

A11.***Зотов М.Б.*** Разработка и измерение основных параметров приемной системы для радиотелескопа РТ-70 в режиме его совместной работы с РСДБ-комплексом «Квазар-КВО»// Двадцатая Санкт-Петербургская Ассамблея молодых ученых и специалистов— 2015 — С. 169

A12.*В. В. Гламаздин, А. А. Евстигнеев, **М. Б. Зотов**, Д. В. Иванов, С. И. Иванов, А. В. Ипатов, А. С. Лавров, В. В. Мардышкин, А. О. Перов, А. М. Пилипенко, В. Н. Скресанов, В. К. Чернов, В. В. Чмиль, В. М. Чмиль.* Разработка приемных устройств радиотелескопов РТ-70 для совместных наблюдений с

РСДБ-комплексом Квазар-КВО // Труды ИПА РАН. — 2015. — Вып. 32. — С. 10–20.

А13. ***Зотов М.Б.***, *Ипатов А. В., Мардышкин В.В., Иванов С.И*. Разработка и измерение основных параметров приемной системы для радиотелескопа РТ-70 в режиме его совместной работы с РСДБ-комплексом «Квазар-КВО» // 25-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2015).: материалы конф. в 2 т – Севастополь, 2015. –Т.2, С. 1088–1089.

А14. ***Зотов М.Б.***, *Иванов С.И.* Измерение параметров нелинейности СВЧ тракта радиоастрономической приемной системы S/X диапазонов длин волн // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо’2016). Севастополь, 4-10 сентября 2016 г.: материалы конф. в 13 т. - Москва ; Минск ; Севастополь, 2016. - Т. 11, С. 2474–2479.

А15. *V. Chernov, A. Evstigneev, O. Evstigneeva, D. Ivanov, A. Ipatov, I. Ipatova, E. Khvostov, A. Lavrov, V. Mardyshkin, I. Pozdnyakov, Y. Vekshin,* ***M. Zotov****.* The S/X/Ka Receiving System for Radio Telescope RT-13 of the «Quasar» VLBI Network // Труды ИПА РАН. — 2017. — Вып. 41. — С. 79–84.

Цитируемые источники

1. *Есепкина Н. А., Корольков Д. В., Парийский Ю. Н.* Радиотелескопы и радиометры. — М.: Наука, 1973. — 416 с.
2. *Ishii Atsutoshi, Ichikawa Ryuichi, Takiguchi Hiroshi, Takefuji Kazuhiro, Ujihara Hideki, Koyama Yasuhiro, Kondo Tetsuro, Kurihara Shinobu, Miura Yuji, Matsuzaka Shigeru, Daisuke Tanimoto* Current status of development of a transportable and compact VLBI system by NICT and GSI // IVS NICT Technology Development Center news, No. 31, 2010. P.2– 5.
3. *Ryoji Kawabata, Shinobu Kurihara, Jiro Kuroda, Misao Ishihara, Kensuke Kokado, Ryuichi Ichikawa, Hiroshi Takiguchi, Kazuhiro Takefuji, Moritaka Kimura, Yasuhiro Koyama, Atsutoshi Ishii, Yasuko Mukai, Kentaro Nozawa and Daisuke*

Tanimoto Geodetic VLBI Observation by Compact Antennas // IVS NICT Technology Development Center news, No. 32, 2011. P.26– 27.

4. *Trask D. W., Brunn M. L., Cohen E. J., Davidson J. M., Fanselow J. L., MacDoran P. F., Miller R. B., Niell A. E., Parks G. S., Resch G. M., Skjerve L. J., Vegos C. J., and Wallace K. S.* Mobile VLBI Surveying: Instrumentation, Operating Procedures, and Survey Results of ARIES // Proceedings of Symposium No. 5: Geodetic Applications of Radio Interferometry — 1982— P. 120–133.
5. *Brunn D. L., Wu S. C., Thorn E. H., McLaughlin F. D., Sweetser B. M.* ORION Mobile Unit Design // TDA Progress Report 42-60 — 1980 — P. 6–32.
6. *Clements P. A.* A Frequency and Timing Subsystem for the ORION Mobile Unit // TDA Progress Report 42-62 — 1981 — P. 3 – 9.
7. *Wu S. C.* A Covariance Analysis for the Determination of Baselines Observing GPS Satellites // TDA Progress Report 42-73 — 1983 — P. 65 – 73.
8. *Wu S. C.* ORION S-Band Data Acquisition for S-X Calibration // TDA Progress Report 42-59 — 1980 — P. 33 – 36.
9. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 1999 Annual Report. Edited by N.R. Vandenberg NASA/TP-1999-209243. 308 P.
10. *Hayo Hase, Armin Boer, Stefan Riepl, Wolfgang Schluter, Adriano Cecioni* TIGO – Transportable Integrated Geodetic Observatory 2001. [Электронный ресурс] URL: https://cddis.nasa.gov/lw12/docs/Riepl_Tigo.pdf (дата обращения: 09.01.2019).
11. *Hayo Hase* Transportable Integrated Geodetic Observatory 1999. [Электронный ресурс] URL: http://ivscc.bkg.bund.de/publications/ar1999/nstigo/ (дата обращения: 09.01.2019).
12. *Hayo Hase et. al.* Transportable Integrated Geodetic Observatory (TIGO) // IVS 2000 General Meeting Proceedings, P. 383–387.
13. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2015+2016 Biennial Report. Edited by K.D. Baver, D. Behrend, K. L. Armstrong. NASA/TP–2017–219021. 344 P.

14. *Ichikawa Ryuichi, Kuboki Hiromitsu, Koyama Yasuhiro, Nakajima Junichi, Kondo Tetsuro* Developing of the new VLBI facility with a 2.4-m dish antenna at NICT // IVS NICT Technology Development Center news, No. 26, 2005. P.13.
15. *Ishii Atsutoshi, Ichikawa Ryuichi, Kuboki Hiromitsu, Koyama Yasuhiro, Takashima Kazuhiro, Fujisaku Jyunichi* VLBI Experiments Using CARAVAN2400 // IVS NICT Technology Development Center news, No. 27, 2006. P.9– 13.
16. *Ishii Atsutoshi, Ichikawa Ryuichi, Takiguchi Hiroshi, Kuboki Hiromitsu, Kimura Moritaka, Nakajima Junichi, Koyama Yasuhiro, Takashima Kazuhiro, Fujisaku Jyunichi* Development of a compact VLBI system for a length examination of a reference baseline // IVS NICT Technology Development Center news, No. 28, 2007. P.2– 5.
17. *Mamoru Sekido, Kazuhiro Takefuji, Hideki Ujihara, Thomas Hobiger, Masanori Tsutsumi, Shingo Hasegawa, Yuka Miyauchi, Ryuichi Ichikawa, Yasuhiro Koyama, and Tetsuro Kondo* Development of Wide-band VLBI system (Gala-V) // IVS NICT Technology Development Center news, No. 33, 2013. P.11– 14.
18. *Hideki Ujihara* Development of Wideband Antenna // IVS NICT Technology Development Center news, No. 36, 2016. P.13.
19. *M. Sekido, K. Takefuji, H. Ujihara, T. Kondo, Y. Miyauchi, M. Tsutsumi, E. Kawai, S. Hasegawa, J. Komuro, R. Ichikawa, Y. Koyama, Y. Hanado, K. Terada, K. Namba, R. Takahashi, T. Aoki, T. Ikeda, R. Kawabata, M. Ishimoto, T. Wakasugi, Y. Umei, T. Toyoda, K. Watabe, and T. Suzuyama* Development Status of GALAV Broadband VLBI — Geodetic Solution and Clock Comparison // IVS NICT Technology Development Center news, No. 36, 2016. P.14–19.
20. *Жаров В.Е.* Основы радиоастрономии. — М.: Физический факультет МГУ, 2011.— 280 с.
21. *Губанов В. С., Финкельштейн А. М.* Базовая система фундаментального координатно-временного обеспечения страны — радиометрический комплекс КВАЗАР. — Л.: 1990. — 115 с.
22. *Уилсон Т.Л., Рольфс К., Хюттемейстер С.* Инструменты и методы радиоастрономии / Перевод с англ. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. — 568 с.

23. *Томпсон А.Р., Моран Д.М., Свенсон Д.У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии // Перевод с англ. под ред. Л.И. Матвеенко. — 2-е изд. — М. ФИЗМАТЛИТ, 2003 — 624 с.
24. *Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Ilin G., Skurikhina E., Surkis I., Mardyshkin V., Mikhailov A., Salnikov A., Vytnov A., Rakhimov I., Dyakov A., Olifirov V.* Russian VLBI network «Quasar»: Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics, Volume 10, Issue 2 , 150–156 (2019).
25. *Иванов Д. В., Ипатов А. В., Ипатова И. А., Мардышкин В. В., Михайлов А.Г..* Приемники радиоинтерферометрической сети Квазар // Труды ИПА РАН, 1997. — Вып. 2. — С. 242–256.
26. *Кольцов Н. Е., Мардышкин В. В., Маршалов Д. А., Евстигнеев А. А.* Результаты модернизации приемных каналов S/X диапазонов длин волн на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН, 2012. — СПб.: ИПА РАН. — Вып.23. С. 224–229.
27. *Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Мардышкин В. В., Федотов Л. В.* Блоки усиления и преобразования частот сигналов для радиоастрономических приемников. // Приборы и техника эксперимента, 2011. — М.: Наука. — №6. — С. 41–50.
28. *Маршалов Д. А., Кольцов Н. Е.* Широкополосные усилительно-преобразовательные устройства для радиоастрономических приёмников. // Труды ИПА РАН, 2007. — Вып. 16. — С. 245.
29. *Евстигнеев А.А., Лавров А.С., Мардышкин В.В.* Двухдиапазонный блок генераторов шума // Труды ИПА РАН, 2010. — СПб.: ИПА РАН, Вып 21. — С. 57 − 61.
30. *Ipatov A.V.* A new-generation interferometer for fundamental and applied research // Phys.-Usp., 2013. — Vol. 56. — no.7. — P. 729–737.
31. *Ipatov A, Ipatova I., Mardyshkin V., Evstigneev A., Khvostov E., Chernov V.* Triband system for the Russian interferometer // VGOS: The New VLBI network.

IVS 2014 General Meeting Proceedings. Science Press, Beijing, China, 2014. P. 118–121.

32. *Иванов Д. В., Мардышкин В. В., Лавров А. С., Евстигнеев А. А.* Трехдиапазонная приемная система для радиотелескопов с малыми антеннами. // Труды ИПА РАН. — СПб.: Наука, 2013. — Вып. 27. — С. 197—203.
33. *Ипатов А. В., Ипатова И. А., Иванов Д. В., Евстигнеев А. А., Мардышкин В. В., Лавров А. С., Хвостов Е. Ю., Чернов В. К.* Радиоастрономическая приемная система для 13,2 м антенн // Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (ВРК-2014): тезисы докладов, 2014. — С. 87–88.
34. *Ипатов А. В., Чмиль В. М., Скресанов В. Н., Иванов Д. В., Мардышкин В. В., Чернов В. К., Пилипенко А. М., Кириленко А. А.* Криогенный приемный фокальный блок для телескопов радиоинтерферометрического комплекса нового поколения // Радиофизика и радиоастрономия, 2014. — Т.19, №1. — С. 81–96.
35. *Евстигнеев А. А., Евстигнеева О. Г., Лавров А. С., Мардышкин В. В., Позднякова И. А., Хвостов Е. Ю.* Результаты разработки сверхширокополосной приемной системы радиотелескопа РТ-13 // Труды ИПА РАН, 2015. — Вып. 35. С. 98– 103.
36. *Роев А. А., Чернов В. К.* Сверхширокополосный облучатель радиотелескопа глобальной сети VGOS // Труды ИПА РАН. — 2015. — Вып. 32. — С. 59–64.
37. *Evstigneev A., Evstigneeva O., Khvostov E., Lavrov A., Mardyshkin V., Pozdnyakov I.*. The Ultra-Wideband Receiver System for RT-13 Radio Telescope IAA RAS «Quasar» Network // Труды ИПА РАН , 2017. — Вып.41. — С. 49–52.
38. Данные наблюдений сессии IVS-R1875. [Электронный ресурс] URL: https://ivscc.gsfc.nasa.gov/sessions/2019/r1875/ (дата обращения: 07.02.2019)
39. Low-Noise Systems in the Deep Space Network. Edited by Macgregor S. Reid Deep Space Communications and Navigation Series. Edited by Jon Hamkins. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology, 2008. 372 P.

40. *Lee J. L.* Improvements in or relating to Microwave Aerials. Patent GB973583A, 1962.
41. *Ahmed HalidAkgiray* New Technologies Driving Decade-Bandwidth Radio Astronomy: Quad-Ridged Flared Horn & Compound-Semiconductor LNAs // PhD Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, California, 2013.
42. Разработка приемной аппаратуры компактных РСДБ радиотелескопов для решения задач астрометрии: Отчет о НИР Развитие методов и аппаратно-программных средств комплекса «Квазар-КВО» (0042 - 2018 - 0016). — 2020.
43. Наземная спутниковая станция типа ТЕСЛА S11 DP 425 и ТЕСЛА S11 DD 424. Инструкция по обслуживанию и уходу.
44. *S. M. Radicella, B. Nava, and P. Coïsson*. Ionospheric models for GNSS single frequency range delay corrections // Física de la Tierra, vol. 20, pp. 27–39, 2008.
45. *Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Носов Е. В., Федотов Л. В.* Цифровая система преобразования сигналов нового поколения для российской РСДБ-сети // Труды ИПА РАН. — 2010. — Вып. 21. — С. 3–13.
46. *Носов Е. В., Федотов Л. В.* Цифровая система преобразования сигналов нового поколения для радиотелескопов // Труды ИПА РАН. — 2018. — Вып. 45. — С. 72–84.
47. *Айзенберг Г.З.* Антенны УКВ. Часть 1. 1977 г.
48. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнических спец. *вузов.– М.: Высш. шк., 1988.–432 с.*
49. *Замотринский В.А., Шангина Л. И.* Устройства СВЧ и антенны. Часть 1. Устройства СВЧ: Учебное пособие. – Томск: Томский университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. 222 с.
50. *Астайкин А. И., Троцюк К. В., Ионова С. И., Профе В. Б. Теория и техника* СВЧ: Учебное пособие. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2008, 464 с.
51. Group and Phase Delay Measurements with Vector Network Analyzer ZVR. Application Note 1EZ35_1E. [Электронный ресурс]. — URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ez35/1ez35_1e.pdf (дата обращения 21.04.2020).

52. R&S ZVA80 Basic Operation Application Sheet 1ZKD-30, M. Jetter, 09/2010 ─ 01 [Электронный ресурс]. — URL: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_manuals/gb_1/z/zva_2/ZVA80_Basic_Operation.pdf (дата обращения 21.04.2020).
53. *Whitney A., Kettenis M., Phillips Ch., Sekido M.* VLBI Data Interchange Format (VDIF) // IVS 2010 General Meeting Proceeding. P. 192-196.
54. *Зотов М. Б.* Разработка и измерение основных параметров приемных устройств радиотелескопа РТ-70 в режиме совместной работы с РСДБ-комплексом «КВАЗАР-КВО» — магистерская диссертация, СПбГПУ ИФНиТ, Санкт-Петербург. 2015 г. – С. 88
55. Разработка приемного устройства для радиотелескопа РТ-70 в Уссурийске для решения задач астрометрии и геодезии: Отчет о НИР Разработка и совершенствование радиоастрономической аппаратуры для решения задач астрометрии и геодезии (0042-2014-0010). —2017.
56. *Зотов М.Б., Иванов С.И.* Основные рабочие характеристики блока промежуточной частоты приемного комплекса радиотелескопа РТ-70 (Уссурийск) для режима совместных наблюдений в РСДБ-сети «КВАЗАР-КВО» // XVII Всероссийская научная конференция студентов-радиофизиков: Тез. докл. – СПб.: Изд-во «Соло», 2014. – С.32-34.
57. *Зотов М.Б., Векшин Ю.В., Иванов С.И. и др.*. Результаты измерения основных характеристик радиоастрономического приемного комплекса S-/X-диапазона для радиотелескопа РТ-70 (г. Уссурийск). // Шестая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2015): тезисы докладов. – СПб.: ИПА РАН, 2015. – С.139.
58. Noise Figure Measurement Accuracy –The Y-Factor Method. Application Note 57-2. Agilent Technologies, Inc. 2004. . − 44 P.
59. *Алмазов К,И, - Долженко,* Коэффициент шума и его измерение на СВЧ, «Научный мир» 2000г.

60. *Поляков А.Е., Стрыгин Л. В.* Методика измерения IP2 и IP3 двухтонального сигнала // Труды Московского физико-технического института, том 4, № 2 — 2011 г.
61. *Razavi. B*. RF microelectronic – Printice Hall PTR, 1998. - 336p.
62. *Крюгер А.* Солнечная радиоастрономия и радиофизика. М.: Мир, 1984.
63. *Векшин Ю.В. , Кен В.О. , Хвостов Е.Ю. , Лавров А.П.* Макет радиоинтерферометра для определения параметров корреляционного отклика приемно-регистрирующей аппаратуры радиотелескопов РТ-13 // Радиотехника, №12, 21–28 (2018)
64. *Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А., Носов Е.В., Федотов Л.В.* Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономических радиоинтерферометров // Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2014, №1. – С. 34–39.
65. *Безруков И.А., Сальников А.И., Яковлев В.А., Вылегжанин А.В.* Система буферизации и передачи данных нового поколения // Труды ИПА РАН, 2015. – Вып. 32. С. 3–9.
66. *Surkis I. F., Zimovsky V. F., Ken V. O., Kurdubova Ya. L., Mishin V. Yu., Mishina N. A., Shantyr V. A.*. A Radio Interferometric Correlator Based on Graphics-Processing Units // Instruments and Experimental Techniques, 2018. – Vol. 61. – No. 6. – P. 772-779.
67. *Векшин Ю. В., Кен В. О.* Анализ стабильности задержки сигналов в приемно-регистрирующей аппаратуре радиотелескопов РТ-13 по результатам корреляционной обработки РСДБ-наблюдений // Труды ИПА РАН. — 2019. — Вып. 51. — С. 42–48.
68. *Weiland J. L., Odegard N., Hill R. S., Wollack E., Hinshaw G., Greason M. R., Jarosik N., Page L., Bennett C. L., Dunkley J., Gold B., Halpern M., Kogut A., Komatsu E., Larson D., Limon M., Meyer S. S., Nolta M. R., Smith K. M., Spergel D. N., Tucker G. S., and Wright E. L.* Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Planets and Celestial Calibration Sources // The Astrophysical Journal Supplement Series, 2011 – Vol. 192 – No. 2. P. 1–21.

69. *Yu. Vekshin, V. Chernov, D. Ivanov, M. Kharinov, E. Khvostov, V. Mardyshkin, A. Mikhailov* The Parameters of the RT-13 Radio Telescopes of the «Quasar» VLBI Network of the IAA RAS in S/X/Ka Bands // Труды ИПА РАН. — 2017. — Вып. 41. — С. 135–140.

70. *Shuygina N., Ivanov D., Ipatov A., Gayazov I., Marshalov D., Melnikov A., Kurdubov S., Vasilyev M., Ilyin G., Skurikhina E., Surkis I., Mardyshkin V., Mikhailov A., Salnikov A., Vytnov A., Rakhimov I., Dyakov A., Olifirov V.* Russian VLBI network «Quasar»: Current status and outlook // Geodesy and Geodynamics. 2019. — Vol. 10, Is. 2. — P. 150-156.

71. *Deller, A.* et al. DiFX-2: a more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator. PASP, 123, 275-287 (2011).

72. *Surkis I., Ken V., Kurdubova Ya., Melnikov A., Mishin V., Mishina N., Shantyr V., Zhuravov D., Zimovsky V.*. IAA Correlator Center Biennial Report 2015+2016. International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2015+2016 Biennial Report. NASA/TP-2017-219021 / K. D. Baver, D. Behrend, and K. L. Armstrong (eds.). – 2017. – P. 163-165.

73. *Губанов В.С., Суркис И. Ф., Козлова И. Ф., Русинов Ю. Л.* Обработка РСДБ-наблюдений: Программный пакет QUASAR // Сообщения ИПА РАН, 2002. NN 141, 142, 143, 144, 145.

Приложение А

Список источников наблюдаемый в сеансе IVS-R1875

Источник	Поток источника в X-диапазоне, Ян	Поток источника в S-диапазоне, Ян
2302+232	0.20	0.25
2232-488	0.53	0.48
NGC1052	0.17	0.16
1842+681	0.39	0.34
0507+179	0.71	0.20
0919-260	0.65	0.28
1145-071	0.43	0.30
0729+259	0.22	0.32
1252+119	0.39	0.29
0537-286	0.55	0.78
0202+319	1.09	0.70
0716+714	0.95	0.44
2013+163	0.29	0.18
1504+377	0.47	0.48
2355-106	0.56	0.72
2126-158	0.64	0.61
1502+036	0.43	0.47
1751+288	0.85	0.76
0131-522	0.96	0.90
0529+483	0.87	0.48
1657-261	0.77	0.25
0346-279	0.44	0.25
2144+092	0.55	0.46
OK290	0.49	1.12
1741-038	2.35	2.67
1424-418	1.38	0.95
1921-293	5.25	3.18
0727-115	2.92	2.07
1144-379	1.37	0.94
1300+580	0.41	0.44
1334-127	3.16	1.90
1128+385	0.75	0.67
2000+472	0.61	0.50
0119+041	0.42	0.85
0420-014	1.60	1.43
1617+229	0.23	0.48
0804+499	0.47	0.54
2357-318	0.29	0.55
2309+454	0.43	0.27
1111+149	0.18	0.31
0340+362	0.23	0.30
0823+033	0.75	0.69
0025+197	0.29	0.23
2229+695	0.38	0.47
1306+360	0.39	0.22
0229+131	0.58	0.91
1636+473	0.49	0.29

0656+082	0.35	0.38
2113+293	0.39	0.47
1759-396	1.18	0.66
1602-115	0.41	0.31
1519-273	0.73	0.85
0955+476	0.92	0.91
2318+049	0.66	0.59
0530-727	0.14	-
1244-255	0.59	0.38
2008-159	1.41	0.69
1053+704	0.36	0.26
3C446	1.81	1.20
1034-293	0.70	0.49
1725+123	0.46	0.24
2052-474	0.69	0.82
NGC6251	0.19	0.23
0308-611	0.57	-
0847-120	0.53	0.42
0641+392	0.18	0.42
1806+456	0.41	0.21
0437-454	0.67	0.67
1909+161	0.26	0.22
0332+078	0.14	0.34
OJ287	2.13	1.31
1413+135	0.53	0.15
0646-306	0.45	0.46
1514+197	0.49	0.35
NRAO150	3.35	0.09
1615+029	0.18	0.22
0322+222	0.67	0.60
0434-188	0.30	0.77
0019+058	0.29	0.31
2255-282	1.95	0.89
1243-072	0.49	0.42
0920-397	0.41	0.43
0151+474	0.40	0.24
1324+224	0.70	0.93
0556+238	0.35	0.37
0048-097	0.73	0.60
0454+844	0.14	0.21
0748+126	1.45	0.73
2059+034	0.58	0.31
0332-403	0.34	0.60
1846+322	0.51	0.54
1145+268	0.25	0.31
0912+029	0.19	0.24
1656-075	0.23	0.28
1954-388	1.12	1.10