

На правах рукописи

ЗОТОВ Максим Борисович

**ПРИЕМНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КОМПАКТНОЙ АНТЕННЫ
ПЕРЕДВИЖНОЙ РСДБ-СТАНЦИИ**

Специальность 01.03.02 — «Астрофизика и звездная астрономия»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной астрономии Российской академии наук

Научный руководитель: Иванов Дмитрий Викторович,
кандидат физико-математических наук, директор
ФГБУН Института прикладной астрономии Рос-
сийской академии наук (ИПА РАН)

Официальные оппоненты: Мингалиев Марат Габдуллович,
доктор физико-математических наук, и. о. руково-
дителя научного направления ФГБУН Специа-
льной астрофизической обсерватории Российской
академии наук (САО РАН)

Белов Юрий Иванович,
кандидат физико-математических наук, ведущий
научный сотрудник Научно-исследовательского
радиофизического института ФГАОУ ВО Нацио-
нального исследовательского Нижегородского го-
сударственного университета им. Н. И. Лобачев-
ского (НИРФИ ННГУ)

Ведущая организация: ФГБУН Крымская астрофизическая обсерватория
Российской академии наук (КрАО РАН)

Защита состоится «28» января 2022 г. в 10 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте прикладной астрономии Российской академии наук по адресу: 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной астрономии Российской Академии наук и на сайте
<http://iaaras.ru/about/dissertational-board/>

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Бондаренко Ю.С.

Актуальность темы

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.

Основными вопросами создания новых и модернизации действующих сетей являются улучшение разрешающей способности РСДБ-сети и достижение максимальной чувствительности радиотелескопа. Очевидные пути их 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 комбинируя большие ($A_{эфф} \approx 10^2 \div 10^3 \text{ м}^2$) и весьма малые ($A_{эфф} \approx 10 \text{ м}^2$) 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 — один 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.

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. 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 минимизировать 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 диссер-**

тационной 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-станций.
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 около 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 космических радиоисточников в заданной полосе частот (8.2–9.1 ГГц). Данный облучатель в совокупности с антенной системой РТ-4 обеспечивает коэффициент использования поверхности ($KИП$) 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.

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 [1–7], 2 статьи, входящие в международную реферативную базу данных Scopus [6, 7], 9 статей в рецензируемых журналах [1–7, 12, 15], 6 работ в материалах конференций [8–11, 13, 14].

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

- в работах [1, 2, 5–7, 9–14] — непосредственное участие в разработке, исследовании и внедрении аппаратуры приемных устройств;
- в работах [1, 5, 7, 15] — непосредственное участие в наблюдениях;
- в работе [3] — непосредственное участие в разработке и опытной эксплуатации контрольно-измерительной системы;
- в работах [4, 7] — непосредственное участие в создании аппаратно-программного комплекса для исследований, подготовке и проведении исследований;
- в работах [8, 13, 14, 15] — 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.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна и практическая значимость результатов работы, перечислены положения, выносимые на

защиту, и публикации, содержащие основные результаты работы, даны сведения об апробации работы на научных конференциях.

В первой главе формулируются требования к разрабатываемой приемной системе для передвижных РСДБ-станций. Приведен обзор существующих приемных систем, установленных на компактных радиотелескопах передвижных РСДБ-станций (ORION, TIGO, CARAVAN2400 и MARBLE). Представлены их основные характеристики и рассмотрены особенности исполнения. На примере зарубежных аналогов рассмотрены различные типы антенных систем компактных радиотелескопов. 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 International VLBI Service (IVS). В качестве критерия оценки возможности использования передвижной РСДБ-станции используется отношение сигнал-шум на выходе коррелятора (SNR):

$$SNR = \frac{\eta \pi F \cdot 10^{-26} \cdot D_1 D_2}{8k} \sqrt{\frac{КИП_1 КИП_2}{T_{сис1} T_{сис2}}} \cdot \sqrt{2\Delta f t},$$

где k — постоянная Больцмана, D_1 и D_2 — диаметры радиотелескопов, с соответствующими коэффициентами использования поверхности $КИП_1$ и $КИП_2$ и шумовыми температурами системы $T_{сис1}$ и $T_{сис2}$, F — плотность потока радиоисточника, выраженная в Янских, η — коэффициент, учитывающий потери при квантовании сигналов и их обработке, для 2-битового квантования $\eta = 0.88$, Δf — ширина полосы регистрации, t — время накопления. На основании проведенного анализа сделан вывод, что для полноценной работы в составе комплекса «Квазар-КВО» диаметр антенны передвижной РСДБ-станции должен составлять не менее 4-х метров. Под полноценной работой подразумевается совместная работа с радиотелескопами РТ-13 по программам наблюдений IVS. Кроме того, приемная система должна быть совместима по основным параметрам с приемными системами других радиотелескопов, работающих в РСДБ-сети. Для определения требования совместимости 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 (РТ-4). Сформулированы основные требования к разрабатываемой приемной системе:

- Совместимость по основным характеристикам с приемными системами радиотелескопов, работающих в РСДБ-сети «Квазар-КВО», и соответствие возможностям антенной системы РТ-4.

- 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 60 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 систем регистрации. 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.

- Аппаратура приемной системы должна быть распределена по доступному объему фокального и подзеркального пространства антенной системы с минимальными потерями характеристик.

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

Во второй главе приведены конструктивные решения, использованные при разработке и изготовлении ПС для передвижной РСДБ-станции. Разработанная ПС представляет собой устройство, состоящее из нескольких основных блоков, предназначенное 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. Таким образом, при выборе схемы радиометра можно отказаться от значительно более сложной схемы радиометра с пилот-сигналом (модуляционной) в пользу схемы радиометра полной мощности.

Ограниченный объем фокального пространства позволяет разместить в нем только облучатель-рупор. Для достижения минимальной шумовой температуры разделитель поляризаций и входные усилительные каскады приемной системы размещены в блоке приемном криостатируемом (БПК) и охлаждаются до криогенных температур. БПК размещен в подзеркальном пространстве, где также размещены блоки преобразования частоты (БПЧ) и аппаратура амплитудной и фазовой калибровки.

Представлена функциональная схема приемной системы (Рис. 1), 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 характеристик основных блоков.

Впервые в РФ создана высокочувствительная приемная система для передвижной РСДБ-станции, включающая БПК, два БПЧ и блок генераторов шума (БГШ). 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.

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 БПК 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 (с диаметром зеркала менее 5 м).

Определены параметры БПК, в частности коэффициент усиления составляет 28 дБ при неравномерности не более 2.5 дБ, шумовая температура — 15 К, что позволяет рассчитывать на достижение шумовой температуры приемной системы — 35 К. Среднеквадратичное отклонение фазочастотной характеристики (ФЧХ) БПК от линейной не превышает $\sigma_\varphi=6^\circ$, таким образом ухудшение отношения сигнал-шум из-за отклонения ФЧХ от линейной не превышает 1.5%, что практически не оказывает влияния на результат корреляционной обработки. Исследованы характеристики БПК и БГШ данной

приемной системы. Средняя величина коэффициента усиления БПЧ составила 32 дБ, а ее неравномерность не превышала 2 дБ в рабочей полосе частот. Общий коэффициент усиления ПС превышает 60 дБ, данное значение оптимально для выбранной системы регистрации. Неравномерность амплитудно-частотной характеристики ПС не превышает 3 дБ, что приведет к ухудшению отношения сигнал-шум менее чем на 2.5%. Шумовая температура БПЧ не превышала 500 К, таким образом вклад БПЧ в шумовую температуру ПС составит менее 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.

Проведено компьютерное моделирование размещения составных частей приемной системы на радиотелескопе РТ-4 — прототипе передвижной РСДБ-станции. При моделировании были учтены: особенности размещения облучателя и входного СВЧ-тракта, требование уменьшения длины СВЧ-соединений, размещение вспомогательной аппаратуры, систем регистрации и частотно-временной синхронизации, способы их взаимодействия с приемной системой, а также функции охлаждения аппаратуры приемной системы.

В третьей главе изложены методики и результаты комплексных исследований созданной приемной системы. Шумовая температура ПС без облучателя и волноводного тракта составляет 15 К, с волноводным трактом — 26 К. Это позволило проверить корректность расчета вкладов различных узлов в шумовую температуру ПС, правильность выбранных конструктивных решений и подтвердить, что использование входного волноводного СВЧ-тракта в созданной приемной системе ведет к минимизации потерь и, как следствие, уменьшению шумовой температуры системы. Определены значения амплитудных калибровок, которые позволят контролировать характеристики приемной системы на радиотелескопе.

Проведены исследования нелинейных характеристик (искажений) БПК и всей приемной системы. Методики измерений и обработки, а также результаты измерений параметров нелинейности представлены в работе. Приведены результаты оценки динамического диапазона и устойчивости приемной системы к воздействию помех (в частности параметр IP_3 — точка пересечения интермодуляции третьего порядка). Определены точки компрессии и динамический диапазон, свободный от интермодуляционных искажений, для обоих каналов приемной системы. Знание данных параметров позволяет избежать нелинейного режима работы отдельных каскадов приемной системы и иметь представление об уровнях мощности в разных точках приемной системы.

Рассмотрена совместная работа приемной системы с системой регистрации и системой частотно-временной синхронизации. Для комплексной проверки разработанной приемной системы был создан стенд «интерферометра на нулевой базе». Он состоит из разработанной ПС, широкополосной приемной системы, трехдиапазонной радиоастрономической приемной системы и приемной системы X-диапазона РТ-32, а также систем регистрации и частотно-временной синхронизации. Для сравнения параметров корреляционного отклика использованы все четыре приемные системы. Данный стенд позволил оценить возможность работы разработанной ПС в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» и получить корреляционный отклик в лабораторных условиях. Представлены полученные результаты, методики измерения и расчет таких параметров корреляционного отклика как: отношение сигнал-шум и среднеквадратическое отклонение (СКО) определения задержки.

Исследования разработанной ПС для передвижной РСДБ-станции показали, что вносимые созданной приемной системой и системой регистрации СКО задержки не превышают 5 пс (при 30-минутном эксперименте с широкополосной приемной системой). Результаты показали хорошее совпадение расчетных значений с экспериментальными, полученными на базах образованных приемными системами комплекса «Квазар-КВО» и созданной приемной системой. В табл. 1 приведены результаты измерения основных параметров разработанной приемной системы.

Таблица 1. Основные параметры разработанной приемной системы.

Параметр	Значение	
	RCP	LCP
Поляризация		
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	не более 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 $P_{1дБ}$	–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 говорить о возможности ее успешного

использования на радиотелескопе РТ-4 передвижной РСДБ-станции в режиме совместных наблюдений с комплексом «Квазар-КВО».

В четвертой главе диссертации представлены результаты РСДБ-наблюдений радиотелескопа РТ-4 — прототипа передвижной РСДБ-станции в составе РСДБ-комплекса «Квазар-КВО». Рассмотрен вклад созданной приемной системы в шумовую температуру системы компактной антенны прототипа передвижной РСДБ-станции. Проведено 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. На основе детального анализа определены вклады основных составляющих в шумовую температуру системы для каналов обеих поляризаций.

По результатам измерений шумовая температура разработанной приемной системы $T_{\text{пс}}$ в канале правой поляризации (RCP) составила 37 К, в канале левой поляризации (LCP) — 36 К. В качестве основной характеристики радиотелескопа используется параметр $SEFD$ (эквивалентная плотность потока системы радиотелескоп-радиометр). Значение $SEFD$ для радиотелескопа РТ-4 составляет 16000–18000 Ян в зависимости от угла места и погодных условий. Результаты радиометрических измерений по радиоисточнику Лебедь А на угле места 70° представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты радиометрических измерений на радиотелескопе РТ-4.

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

Расчетная шумовая температура антенны РТ-4 в идеальных условиях, учитывая модель JPL (Jet Propulsion Laboratory), составляет около 16 К. Размеры ДН облучателя приводят к незначительному переоблучению через кромки контррефлектора, так как контррефлектор при замене облучателя не менялся. Это привело к увеличению шумовой температуры антенны до 19–20 К и, как следствие, шумовая температура системы $T_{\text{сис}}$ достигает 55 К, что в целом можно считать хорошим результатом для радиотелескопа передвижной РСДБ-станции.

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 взаимнокорреляционные отклики при наблюдении источников радиотелескопом РТ-4 совместно с обсерваториями «Зеленчукская» и «Бадары».

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

Для сравнения в табл. 3 представлены основные характеристики систем радиотелескоп-радиометр для передвижных РСДБ-станций и прототипа передвижной РСДБ-станции РТ-4 с разработанной приемной системой. Принимая во внимание отношение диаметров антенн, РТ-4 соответствует параметрам станции TIGO и превосходит остальные.

Таблица 3. Характеристики антенн передвижных РСДБ-станций.

Станция	D_a , м	$SEFD$, Ян	$KИП$	$T_{сис}$, 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	$1\text{--}2 \cdot 10^6$	0.10–0.15	200–300	65–70	3–11
MARBLE2	2.4	$2\text{--}4 \cdot 10^5$	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 соответствуют уровню лучших зарубежных аналогов.

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 $T_{\text{сис}}=55\text{--}57\text{ К}$ при $K_{\text{ПП}}=0.65$ и чувствительность порядка 0.5 мК позволяют радиотелескопу РТ-4, оснащенный 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 радиоастрономических приемных систем для подтверждения полученных характеристик разработаны методики испытаний созданной приемной системы.

Список опубликованных автором работ по теме диссертации

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

1. *Евстигнеев А. А., Векишин 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.
2. *Евстигнеева О. Г., Векишин 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.
3. *Векишин 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.
4. *Векишин 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.
5. *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

6. *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.
7. *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 Development of 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

8. **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.
9. **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
10. **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.
11. **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
12. *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.
13. **Зотов М.Б., Ипатов А. 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.
14. **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.

15. *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.