

## ОТЗЫВ

Официального оппонента доктора физико-математических наук,  
руководителя научного направления САО РАН  
Мингалиева Марата Габдулловича  
на диссертацию **Зотова Максима Борисовича**  
«Приемная система для компактной антенны передвижной РСДБ-станции»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия.

### 1. Актуальность темы диссертации.

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) в настоящее время является одним из основных методов радиоастрономических исследований, который позволяет решать не только проблемы астрофизики и звездной астрономии, но и прикладные задачи по высокоточному определению параметров вращения Земли. Развитие РСДБ связано с созданием новых и модернизацией действующих сетей. Увеличение эффективной площади радиотелескопов, повышение отношения сигнал-шум и расширение полосы принимаемых частот — позволили расширить возможности РСДБ метода. Совершенствуются способы передачи данных, для быстрой обработки данных разрабатываются корреляторы различного вида. Приемные системы развиваются по пути увеличения числа приемных пунктов и улучшения чувствительности. Эти процессы до настоящего времени находятся в стадии активного развития и дальнейшая модернизация метода РСДБ является естественным и необходимым процессом радиоастрономических научных исследований. Поэтому **актуальность** настоящей работы не вызывает сомнений.

Диссертационная работа М. Б. Зотова направлена на решение важной научно-технической задачи расширения возможностей РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» в интересах астрофизики, космической геодезии и астрономии. Основная цель работы – разработка и исследование высокочувствительной радиоастрономической приемной системы для реализации проекта создания передвижной РСДБ-станции.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и одного приложения. Диссертация содержит 146 страниц, 65 рисунков и 22 таблицы. Список используемой литературы включает 88 наименований.

В весьма информативном **Введении** даётся обзор литературных данных по существующим в настоящее время передвижным РСДБ-станциям, оценивается возможность использования компактных антенн для РСДБ-наблюдений с радиотелескопами комплекса «Квазар-КВО».

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

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.

Во **второй главе** приведены конструктивные решения, использованные при разработке и создании приемной системы для передвижной РСДБ-станции. Автором представлена функциональная схема приемной системы, рассмотрены принципы ее работы и функциональное назначение отдельных блоков. Представлены конструктивные решения для облучателя, приемного тракта и отдельных блоков приемной системы. Результаты экспериментального исследования основных характеристик блоков показали соответствие предъявляемым требованиям к приемной системе.

Автором проведено моделирование 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** приведены результаты и методика измерения шумовой температуры приемной системы без облучателя и волноводного тракта, а также с волноводным трактом. Результаты данных измерений подтверждают расчет вкладов различных узлов в шумовую температуру системы и правильность выбранных конструктивных решений. Приведены методика и результаты оценки динамического диапазона и устойчивости приемной системы к воздействию помех.

Приведены результаты исследования разработанной приемной системы на стенде «интерферометра на нулевой базе», включавшего различные приемные системы, а также системы регистрации и частотно-временной синхронизации. Результаты исследования на стенде «интерферометра на

нулевой базе» 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». Приведена оценка вкладов шумов приемной системы в шумовую температуру системы компактной антенны прототипа передвижной РСДБ-станции. Проводится сравнение с зарубежными передвижными РСДБ-станциями.

По результатам измерений шумовая температура разработанной приемной системы  $T_{\text{nc}}$  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. Приведены результаты совместных РСДБ-наблюдений. 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».

Полученные результаты подтверждают эффективность разработанной автором приемной системы. Первые краткосрочные наблюдения позволили получить трехмерные координаты передвижной станции с ошибкой порядка 10 сантиметров.

Таким образом, автором проведен необходимый анализ современного состояния работ по созданию приемных систем для передвижных РСДБ-станций и сформированы технические требования, предъявляемые к разрабатываемой приемной системе. Далее решались следующие основные задачи:

- проведены исследования возможностей минимизации вкладов отдельных узлов в шумовую температуру системы;
- разработана приемная система для передвижной РСДБ-станции и методики испытаний созданной приемной системы;
- проведены лабораторные исследования характеристик отдельных блоков и приемной системы в целом;
- проведены измерения параметров радиотелескопа передвижной РСДБ-станции с созданной приемной системой;
- выполнены РСДБ-наблюдения с участием прототипа передвижной РСДБ-станции в составе комплекса «Квазар-КВО».

**Новизна** проведенных исследований заключается в том, что в рамках диссертационной работы впервые в отечественной радиоастрономии создан инструмент для отработки принципов «мобильного» РСДБ. Созданная приемная система соответствует характеристикам лучших мировых аналогов. Проведены успешные РСДБ-наблюдения с использованием компактной антенны прототипа передвижной РСДБ-станции. 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. Результаты РСДБ-наблюдений позволили получить трехмерные координаты передвижной станции с ошибкой порядка одного сантиметра.

**Положения, выносимые на защиту** и основанные на полученных автором результатах, состоят в следующем:

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».

**Достоверность и обоснованность** вынесенных положений подтверждается использованием аналитических методов исследования, численного моделирования, схемотехнической разработки и методами программирования в системах автоматизированного проектирования, а также аппаратом теоретической радиотехники и математической статистики. Важнейшим фактором достоверности является апробация проведенной разработки приемной системы на радиотелескопе РТ-4 в РСДБ-наблюдениях в составе комплекса «Квазар-КВО».

**Научная и практическая значимость** результатов исследований заключается в том, что автором создана уникальная приемная система X-диапазона частот с криогенным охлаждением входных каскадов усиления. Разработаны облучатель и СВЧ-тракт оригинальной конструкции для антенной системы РТ-4, обеспечивающие прием сигналов от радиоисточников в полосе частот 8.2–9.1 ГГц. В разработанной приемной

системе использован охлаждаемый волноводный разделитель поляризаций, обеспечивающий минимизацию потерь во входном тракте.

Примененное компьютерное моделирование позволило разместить оборудование приемной системы на радиотелескопе РТ-4. Автором разработана оригинальная конструкция подвеса приемной аппаратуры, обеспечивающая минимальную длину входных трактов и использование микрокриогенной системы (МКС) замкнутого цикла Джиффорда-МакМагона. Успешный опыт эксплуатации приемной системы на антенне РТ-4 в обсерватории «Светлое» показал правильность заложенных при проектировании технических решений.

**Рекомендации по использованию полученных результатов.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы практически во всех научных учреждениях России и других стран, которые занимаются проблемами использования РСДБ-наблюдений как для решения задач фундаментальной астрономии и астрофизики, так и прикладных задач космической геодезии.

Материал диссертации изложен достаточно ясно, работа хорошо оформлена.

**Замечания по диссертационной работе.** Выскажу несколько замечаний, абсолютно не влияющих на общую высочайшую оценку работы.

На стр. 25 при формулировке основных принципов построения передвижных РСДБ-станций следовало просто разделить предложения на несколько простых. Например, пункт 1 представляет очень сложную конструкцию и не просто выяснить что «должна включать» и «включающую». ...

Конечно, в некоторый момент наступает некоторая «замыленность» сознания при вычитании очевидных для себя вещей и в тексте не всегда это поясняется. Например, в тексте встречается термин «Приемное устройство» и непонятно, чем это отличается от приемной системы; или РПС (радиоастрономическая приемная система) ШПС (широкополосная приемная система).

Некоторые замечания к оформлению рисунков; а именно, желательно подробнее пояснять содержание рисунков как в самих рисунках, так и в подписях к ним. Естественно, в тексте можно найти более детальное пояснение, однако при чтении это не всегда удобно... Например:

- 1) стр. 53, рис. 2.1 не расшифрованы принятые на рисунке сокращения (БГШ, БПК, ГПИ, БПЧ, ЦСУР, СПШС, ШПК, СЧВС);
- 2) стр. 99 и 101, рис. 3.7 и 3.9 (обозначения SFDR и DR, прямые – 1 и 2); кстати, в списке «Список сокращений и условных обозначений» SFDR и DR также не представлены.
- 3) стр. 114 рис. 4.1 в подписи к рисунку не расшифрованы сокращения (ШНГШ, БГШ, БПК, БПЧ, ИМ, ПК).

Недостаточно ясно (внятно) изложены результаты в разделе 3.3 «Характеристики приемной системы в составе лабораторного макета радиointерферометра» (стр. 105-111). Рецензенту приходилось заниматься вычислениями, чтобы понять (удостовериться) правильность некоторых расчетных и наблюдательных параметров. Например, в таблицах 3.4 и 3.5 разница значений *расчетное и измеренное* (колонка SNR) совсем непонятно: почему измеренные значения лучше расчетных? То ли расчеты делаются некорректно, то ли измерения... Однако скорее всего это связано с точностью измерения (определения) этих параметров, ибо не приводятся ошибки ( $\pm$ ) измерений в этих колонках. В формулу 3.14 (стр. 110) ожидаемое значение СКО определения задержки корреляционного отклика (расчетное значение) входит отношение «сигнал-шум»; однако в таблице 3.14 «сигнал-шум» представлен как «расчетное» и «измеренное»...

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу на актуальную тему. В работе приведены новые научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение задачи, имеющей существенное значение для развития РСДБ и повышения углового разрешения комплекса «Квазар-КВО». Вынесенные на защиту результаты докладывались на отечественных и международных конференциях и опубликованы в зарубежных и отечественных изданиях (из списка ВАК). Несомненно, по общему впечатлению, богатству и важности совокупности представленных в диссертации результатов она заслуживает самой высокой оценки. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертационная работа «Приемная система для компактной антенны передвижной РСДБ-станции» соответствует критериям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», в отношении диссертаций, представляемых на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор **Зотов Максим Борисович** заслуживает

