

## «УТВЕРЖДАЮ»

директор по научной работе  
Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского,  
доктор физико-математических наук

М. В. Иванченко

«29» грудня 2021 р.

## **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского"

на диссертацию Векшина Юрия Вячеславовича

«Аппаратно-программный комплекс и методы исследования стабильности приемных систем радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия.

## **Актуальность темы.**

Повышение чувствительности и стабильности приемной аппаратуры радиотелескопов является актуальной задачей астрофизики и радиоастрономии. Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» Института прикладной Астрономии РАН выполняет как фундаментальные астрономические, так и прикладные исследования в области координатно-временного обеспечения, в том числе глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС. Для повышения точности определения всемирного времени и других параметров вращения Земли приемная аппаратура должна обладать высокой стабильностью. Для исследования стабильности приемных систем и их отдельных частей при условии существенного различия диапазонов рабочих частот и уровней

измеряемой мощности возникает необходимость создания специального аппаратно-программного комплекса и методик.

Поэтому диссертационная работа Векшина Ю. В., направленная на определение источников как амплитудной, так и фазовой нестабильностей приемной аппаратуры, является актуальной.

**Научная новизна** полученных результатов диссертационной работы состоит в следующем.

Созданы аппаратно-программный комплекс и методики, которые позволяют исследовать амплитудную и фазовую стабильность приемных систем радиотелескопов с преобразованием частоты и их отдельных каскадов.

Разработаны методика расчета дисперсии Аллана сигналов, зарегистрированных с «мертвым временем», и методика оценки влияния возмущающих факторов на стабильность с помощью корреляционного анализа.

Разработан и реализован метод измерения и компенсации нестабильности коэффициента усиления приемной системы, позволяющий повысить чувствительность на интервалах усреднения от 1 секунды.

Разработан метод определения оптимального времени накопления корреляционного отклика радиоинтерферометра, при котором достигается минимальная погрешность измерения групповой задержки, что обеспечивает снижение погрешности определения поправок всемирного времени.

С применением созданного аппаратно-программного комплекса измерены основные характеристики радиотелескопов нового поколения РТ-13 при вводе их в эксплуатацию.

### **Практическая значимость.**

Разработанные методики и аппаратно-программный комплекс позволяют проводить исследования стабильности выходной мощности, коэффициента передачи и его фазы, шумовой температуры, групповой задержки приемных систем радиотелескопов, как в целом, так и их отдельных каскадов, в том числе непосредственно на радиотелескопе.

По результатам исследования нестабильности отдельных блоков радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» определены пути повышения стабильности приемных систем: настройка режимов транзисторов малошумящих криогенных усилителей с оптимизацией по чувствительности (учитывающей как шумовую температуру, так и нестабильность), стабилизация напряжений на электродах транзисторов усилителей, улучшение термостабилизации блока преобразования частоты.

Использование созданного аппаратно-программного комплекса обеспечило возможность повышения чувствительности и точности фокусировки радиотелескопа РТ-13, а на радиотелескопе РТ-32 позволило реализовать потенциальное преимущество по чувствительности радиометра полной мощности по сравнению с модуляционным на интервалах усреднения до 10 секунд.

Применение метода определения оптимального интервала накопления корреляционного отклика радиоинтерферометра позволяет оптимизировать планирование РСДБ-наблюдений для наблюдения большего числа источников и уменьшать погрешность определения поправок всемирного времени.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов и выводов обеспечивается корректным применением математического аппарата, обоснованных физических моделей и методов при решении поставленных задач. Полученные в работе экспериментальные результаты в целом достаточно хорошо согласуются с теоретическими оценками, а также с результатами известных работ других авторов по данной тематике.

### **Значимость полученных результатов для развития радиоастрономии и радиоинтерферометрии.**

Предложенные методики покаскадного исследования амплитудной и фазовой стабильности могут быть использованы для широкого круга высокочувствительных измерительных приемников.

Разработанный метод измерения и компенсации нестабильности коэффициента усиления приемной системы и его реализация в устройстве контроля параметров аппаратуры учитывает нестабильность опорного генератора

шума, не требует мощного источника для компенсации выходного сигнала и может использоваться в радиометрах, изначально не предназначенных для работы в модуляционном режиме.

Разработанный метод определения оптимального времени накопления корреляционного отклика может быть использован в различных радиоинтерферометрических системах, осуществляющих измерение временной задержки сигнала.

### **Рекомендации по использованию полученных результатов.**

Результаты диссертации могут быть использованы при исследовании и настройке высокочувствительных приемников и антенных комплексов различного назначения в ИПА РАН, САО РАН, ФИАН, КрАО РАН, ИКИ РАН, ННГУ и других отечественных научно-исследовательских организациях, а также за рубежом.

### **Замечания по диссертационной работе.**

1. Необходима более четкая формулировка личного вклада автора в проведенные исследования.

Большой объем выполненных экспериментальных работ заведомо предполагает участие коллектива сотрудников института и его филиалов. Все публикации по теме диссертации выполнены в соавторстве, но формулировка соответствующего абзаца введения и автореферата означает, что практически вся работа была проделана одним соискателем. В тексте диссертации хотелось бы также видеть пояснения, какие из приведенных на многочисленных графиках и таблицах экспериментальных результатов по исследованию характеристик аппаратуры и антенн получены непосредственно соискателем.

2. Серьезные замечания вызывают приведенные в пятой главе результаты измерения характеристик радиотелескопа РТ-13. Данный вопрос представляется важным, поскольку на нем основан сформулированный в пункте 5 положений, выносимых на защиту, вывод о соответствии РТ-13 лучшим мировым образцам, а также утверждение о превосходстве параметров РТ-13 над характеристиками зарубежных аналогов (параграф 5.3, стр.178, таблица 5.7).

К сожалению, в данной главе диссертации соискатель не приводит свои оценки погрешностей измерения характеристик радиотелескопа, в первую очередь, такого параметра, как SEFD и рассчитываемого на его основе КИП. А погрешности эти могут быть весьма значительными по следующим основным причинам:

2.1. Расчет значений спектральной плотности потока радиоисточника Кассиопея-А, выполненный по формулам (5.2) и (5.3), может дать существенную погрешность из-за различий значений потока на 1980 год, а также векового хода и спектрального индекса этого источника, приводимых в публикациях разных авторов. Убедиться в этом можно, например, ознакомившись с другой работой того же автора, на которого ссылается соискатель – Baars J.W.M. History of Flux-Density Calibration in Radio Astronomy. Radio Science Bulletin No. 348 (March 2014).

По нашим оценкам погрешность расчета современных значений потока Кассиопеи-А на рабочих частотах до Ка диапазона может составить до десяти процентов и более.

2.2. Для коррекции измеренного сигнала, компенсирующей влияние конечных угловых размеров радиоисточника, необходимо знание на рабочей частоте двумерного распределения яркостной температуры по источнику и двумерной диаграммы направленности (ДН) антенны в пределах главного лепестка. Формулы типа (5.4) могут применяться лишь для оценки (но не для вычисления, как пишет автор, стр.169) коэффициента коррекции  $g$  при малых по сравнению с шириной лепестка ДН угловых размерах источника. Кроме того, есть также неопределенность в оценке важнейшего в данном случае параметра  $d$  – угловых размеров источника. Угловые размеры Кассиопеи-А многие авторы оценивают величиной четыре минуты, а, например, по данным работы D. A. Green. A catalogue of 294 Galactic supernova remnants. Bull. Astr. Soc. India (2014) 42, 47–58 он составляет пять угловых минут.

По нашему опыту применение коэффициентов коррекции, рассчитанных по формулам типа (5.4), приводит к недостоверности результатов измерения

коэффициента усиления (КУ) и КИП антенны при ширине лепестка ДН, примерно равной угловым размерам источника. В приводимых соискателем результатах ширина лепестка ДН РТ-13 на частоте 28,5 ГГц ( $2,7'$ ) более чем в полтора раза меньше используемого им значения угловых размеров Кассиопеи-А ( $4,3'$ ), а оценка коэффициента коррекции  $g$  превышает двойку. Это вызывает большие сомнения в достоверности приведенных соискателем результатов измерения КИП РТ-13 в Ка диапазоне.

2.3. Очевидно, что при расчете КИП антенны по формуле (5.5) должны использоваться значения шумовой температуры системы  $T_{\text{сист}}$ , измеренные непосредственно при наблюдении радиоисточника, на его угле места и азимуте, а не значения  $T_{\text{сист}}$  в зените, приведенные на предыдущей странице в таблице 5.1. Автор почему-то на это различие не указал.

2.4. В главе не приведены формулы, использованные для расчета коэффициента  $g_2$ , компенсирующего поглощение в атмосфере, не указаны величины полного вертикального поглощения для всех рабочих частот и погодные условия во время измерений, особенно в Ка диапазоне.

2.5. По нашему мнению, для достижения необходимой точности определения КУ и КИП радиотелескопа необходимо проводить измерения во всех рабочих частотных диапазонах по нескольким радиоисточникам с последующим сравнением результатов и отбраковкой, при необходимости, недостоверных данных. Подобного сравнения в работе не сделано.

3. В работе не приведены также данные о погрешностях измерения шумовой температуры радиотелескопа РТ-13. При этом, например, представленные в таблице 5.1 значения шумовой температуры, измеренные экспериментально и рассчитанные теоретически, совпадают с точностью до одного Кельвина во всех шести каналах. Следовало бы привести оценки погрешности расчетов теоретических значений шумовой температуры, выполненных с использованием моделей ДН и распределений яркостной температуры «грунта и неба», а также оценки погрешности для экспериментальных значений шумовой температуры системы и её отдельных

составляющих.

4. Осталась непонятной приведенная на странице 64 формулировка: «Нескомпенсированной (остаточной) разницей доплеровских частот каналов интерферометра является частота интерференции  $F_i$  (единицы миллигерц), соответствующая скорости изменения фазы корреляционного отклика от времени...». Далее приводится правильная формула для частоты интерференции, хотя перед этим идет речь об измеряемой поправке к частоте интерференции.

5. На странице 98 написано: «При подстановке значений в формулу (3.5), получим погрешность измерения  $\Delta T_{ш} = \pm 4$  К для  $T_{ш}=10$  К,  $\Delta T_{ш} = \pm 9,5$  К для  $T_{ш}=500$  К». Правильно ли указана  $\Delta T_{ш} = \pm 4$  К? Если «да», то какова относительная погрешность?

6. В диссертации и в автореферате нет четкой формулировки основных результатов работы.

7. В тексте диссертации имеется довольно много мелких неточностей.

Отмеченные недостатки диссертации не являются критичными и не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение.**

Диссертация Векшина Ю. В. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой автором предложен и реализован ряд методик и подходов, имеющих существенное научное и практическое значение для развития радиоастрономии и радиоинтерферометрии.

Основные результаты диссертации опубликованы в 18 статьях, из них 12 в журналах, входящих в список ВАК, и 4 в изданиях, входящих в международную реферативную базу Scopus. Результаты работы докладывались на 7 всероссийских и 6 международных научных конференциях.

Диссертация соответствует специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По актуальности выполненных исследований, новизне, научной и практической значимости полученных результатов диссертационная работа

«Аппаратно-программный комплекс и методы исследования стабильности приемных систем радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор Векшин Юрий Вячеславович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 — астрофизика и звездная астрономия.

Диссертация Векшина Ю.В. и отзыв рассмотрены на расширенном заседании кафедры распространения радиоволн и радиоастрономии радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» 29 декабря 2021 года (протокол № 3) с участием специалистов НИРФИ ННГУ (директор НИРФИ, к.ф-м.н. Шиндин А.В.) и ВГБОУ ВО «ВГУВТ» (профессор кафедры физики, д.ф.-м.н. Дугин Н.А.)

Отзыв составил:  
заведующий кафедрой распространения  
радиоволн и радиоастрономии  
Нижегородского государственного  
университета им. Н. И. Лобачевского,  
доктор технических наук  
(специальность 05.12.07 – Антенны,  
СВЧ устройства и их технологии)  
старший научный сотрудник  
телефон. 8(831) 4656127,  
эл. почта: kalinin@rf.unn.ru

*А.Д.Калинин* 29.12.21

Калинин Андрей Владимирович

#### Сведения об организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского" (Нижегородский государственный университет им Н. И. Лобачевского)

адрес: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

телефон: 8(831) 4623085

эл. почта: unn@unn.ru