

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ**

На правах рукописи
УДК 520.27, 520.8.056, 520.374

ЦЫБУЛЁВ Петр Григорьевич

**РАЗВИТИЕ СИСТЕМ РЕГИСТРАЦИИ
РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ПОВЫШЕНИЕ
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАДИОТЕЛЕСКОПА РАТАН-600**

Специальность: 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Нижний Архыз – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки “Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук”

Научный руководитель: академик РАН,
доктор физико-математических наук,
Парийский Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: **Зинченко Игорь Иванович**,
доктор физико-математических наук,
Институт прикладной физики РАН,
г. Нижний Новгород / Зав. отделом
радиоприемной аппаратуры
и миллиметровой радиоастрономии

Косов Александр Сергеевич,
доктор технических наук,
Институт космических исследований РАН,
г. Москва / Зав. лабораторией
микроволновой техники

Ведущая организация: Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

Защита состоится «19» января 2015 года в 14:00
на заседании диссертационного совета Д002.023.01 Физического института им.
П.Н. Лебедева РАН по адресу: Москва, ул. Профсоюзная 84/32, Институт кос-
мических исследований РАН, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физического института им.
П.Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, Ленинский проспект, дом 53.

Автореферат и диссертация в электронном виде представлены на сайте ФИАН
<http://www.asc-lebedev.ru> в разделе "Диссертационный совет".

Автореферат разослан «11» ноября 2014 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Ю. А. Ковалев

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ

Актуальность работы

Радионаблюдения с предельной чувствительностью в *радиоконтинууме* (в непрерывном спектре излучения с полосами $\sim 10 \div 15$ % от центральной частоты) в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн являются основной составляющей всех астрофизических наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. Современный многочастотный комплекс радиометров континуума РАТАН-600 включает в себя на сегодняшний день 30 радиометров в широком интервале частот от 0.5 до 30 GHz . Диссертация посвящена развитию систем и методов регистрации и обработки радиометрических данных комплекса этих радиометров континуума РАТАН-600 с целью повышения таких основных характеристик как абсолютная точность измерений, долговременная стабильность и чувствительность как системы регистрации, так и радиометров. Этим определяется *актуальность* данной работы.

Методы регистрации и обработки сигналов радиометров для проведения радиоастрономических наблюдений получили бурное развитие за последние 30 лет благодаря развитию технических средств аналоговой и *цифровой обработки сигналов* (ЦОС). В измерительной и коммуникационной технике активно применяются быстродействующие *цифровые сигнальные процессоры* (ЦСП), прецизионные *аналого-цифровые преобразователи* (АЦП) и многие другие элементы обработки сигналов. В радиометрии это привело к применению цифровых средств и методов сначала на выходе радиометра, и далее – к продвижению этих средств в область более высоких частот, заменяя собой участки *аналоговой обработки сигналов* (АОС).

Применение современных средств и методов ЦОС позволило коллективу с участием автора в конце 90-х годов успешно решить *актуальную* задачу **активного помехоподавления при наблюдениях в дециметровом диапазоне волн на радиотелескопе РАТАН-600**, что позволило продлить наблюдения в этих диапазонах на 15 лет.

Дальнейшее развитие средств регистрации и обработки радиометрических данных на РАТАН-600 *актуально* в направлении **повышения точности и долговременной стабильности измерений сигналов радиометров**. Ос-

новным типом приемных устройств для наблюдений в радиоконтинууме является *радиометр Р. Дике* [1] в различных вариантах его реализации. Это полностью дифференциальный способ приема, с регистрацией разности основного и опорного сигналов для устранения флуктуаций вида $1/f$ радиометра. Дифференциальный метод не дает прямой информации о *полной мощности* регистрируемого радиоизлучения, которая складывается из двух ключевых составляющих: мощности излучения, поступившего на вход радиометра, и мощности собственных шумов радиометра. О *полной мощности* можно было судить только косвенно - по амплитуде шумовых флуктуаций системы радиотелескоп + радиометр. В связи с дифференциальным приемом в литературе было крайне мало информации о флуктуациях, возникающих в самом радиометре, и их источниках.

Исследование собственных флуктуаций *радиометра полной мощности* требует регистрации его сигнала на *постоянном токе* с применением *усилителей постоянного тока* (УПТ) в отличие от дифференциального *радиометра Дике*. Однако, в радиоэлектронике хорошо известна проблема *дрейфов нуля УПТ* со спектром вида $1/f$ (как и у исследуемых флуктуаций радиометра). В то же время, за последнее десятилетие в радиоэлектронной элементной базе произошел резкий прорыв в области создания *бездрейфовых УПТ*, не имеющих шума вида $1/f$. Это позволяет говорить о постановке задачи в такой формулировке: **построение прецизионной измерительной системы (ИС) для радиометра, не вносящей в измеряемый сигнал собственного шума вида $1/f$** . Построение таких ИС является *актуальным* не только для радиометрии, но и для измерительной техники в целом. Решение данной задачи даст возможность поставить и решить следующую *актуальную* задачу: **исследовать шум вида $1/f$ самого радиометра с целью выявления источников этого шума и возможности их устранения**.

Как уже упоминалось, предложенная Р. Дике в 1946-м году модуляционная схема СВЧ-радиометра [1] является основной схемой в радиометрии по сегодняшний день. Это обусловлено тем обстоятельством, что, хотя чувствительность *модуляционного радиометра* вдвое хуже, чем у *идеального радиометра полной мощности*, расчетная чувствительность *модуляционного радиометра* реализуема на практике на достаточно длинных интервалах времени (до

100 секунд и более), а *расчетную чувствительность идеального радиометра полной мощности* на интервалах времени ≥ 0.01 секунды реализовать не удавалось вследствие появления в самом радиометре шума вида $1/f$ (см. например, [2]). В связи с этим возникает проблема: невозможность реализовать на практике расчетную чувствительность *идеального радиометра полной мощности* – это принципиальное ограничение? Или это ограничение может быть устранено? **На сегодняшний день возможность реализации расчетной чувствительности радиометра полной мощности – это пока неиспользованный резерв повышения чувствительности в СВЧ-радиометрии.** Решение данной задачи повысит вдвое чувствительность радиометрических измерений по сравнению с модуляционным приемом и является *актуальным* как в СВЧ-радиометрии вообще, так и для радиоастрономических наблюдений в частности.

Цель работы

Основной целью данной работы является:

1. Активная помехозащита дециметровых диапазонов радиотелескопа РАТАН-600 в период с 1995 по 2010 год.
2. Построение прецизионной измерительной системы (ИС) для радиометра, не вносящей в измеряемый сигнал собственного шума вида $1/f$ с целью повышения точности и долговременной стабильности измерения сигналов радиометров.
3. Исследование шума вида $1/f$ самого радиометра с целью выявления источников этого шума и возможности их устранения.
4. Повышение чувствительности и долговременной стабильности радиометров континуума радиотелескопа РАТАН-600.
5. Внедрение полученных результатов в непрерывные штатные радиоастрономические наблюдения на радиометрах континуума РАТАН-600 в диапазоне 1-30 ГГц в период с 1995 г. по настоящее время для всех плановых наблюдательных программ.

Основные положения и результаты работы, выносимые на защиту

1. Разработана и внедрена универсальная, прецизионная, встраиваемая в радиометр, сетевая измерительная система, ER-DAS – Embedded Radiometric Data Acquisition System (название автора диссертации). ER-DAS является “строительным блоком” для построения распределенных сетевых систем регистрации радиометрических сигналов и сигналов различных датчиков.
2. Произведена полная модернизация Систем Сбора Данных и Управления (ССДиУ) всех радиометров континуума РАТАН-600 (три приемных комплекса с 30 радиометрами) на новой аппаратно-программной основе (ER-DAS).
3. Устранен основной источник шума вида $1/f$ в *измерительной системе* радиометра. Это позволяет измерять параметры шума вида $1/f$ радиометра, зная, что *измерительная система* не вносит своих дрейфов.
4. Устранен основной источник шума вида $1/f$ в радиометре. Показано, что применение детекторов на основе *туннельных обращенных диодов* вместо детекторов на диодах Шоттки резко снижает шум вида $1/f$ в *радиометре полной мощности*. Впервые на практике реализована чувствительность *идеального радиометра полной мощности* на типовых для РАТАН-600 масштабах времени ~ 10 секунд. При этом чувствительность *радиометра полной мощности* на масштабах времени до ~ 100 секунд остается выше, чем у модуляционного радиометра. Результаты успешно внедрены в работу высокочувствительных радиометров континуума РАТАН-600 для сантиметровых диапазонов длин волн.
5. Работы с участием диссертанта в области активной помехозащиты дециметровых диапазонов (*частотно-временное помехоподавление*) позволили более чем на 10 лет продлить наблюдения на радиометрах 13, 30 и 50 см в условиях ухудшающейся помеховой обстановки.
6. Весь наблюдательный материал РАТАН-600 в континууме, полученный в

течение последних 15 лет круглосуточных плановых наблюдений по всем наблюдательным темам галактической и внегалактической радиоастрономии, записан системами регистрации, разработанными, сопровождаемыми и развиваемыми диссертантом.

Научная новизна работы

1. **Впервые** в практику радиоастрономических наблюдений введена прецизионная *измерительная система*, практически не имеющая собственных дрейфов нуля (шума вида $1/f$). Это позволяет измерять *истинную полную мощность* СВЧ-сигнала, поступившего на детектор радиометра, а также исследовать источники шума вида $1/f$ в радиометре.
2. Используя новую *измерительную систему* получены новые данные по шуму вида $1/f$ в радиометре и по источникам этого шума.
3. Основываясь на этих данных и их анализе, **впервые** устранен основной источник шума вида $1/f$ в радиометре. При этом подъем в спектре мощности выходного шума радиометра сместился от 10–100 Гц к частоте 0.1 Гц, что в 100–1000 раз лучше типичных значений в радиометрии.
4. По этим результатам **впервые** на практике реализована чувствительность *идеального радиометра полной мощности* на масштабах времени ~ 10 секунд. При этом чувствительность *радиометра полной мощности* на масштабах времени до ~ 100 секунд остается выше, чем у модуляционного радиометра.

Научное и практическое значение

Практическое значение полученных результатов таково:

1. Впервые появилась возможность проводить радиоастрономические наблюдения с помощью *радиометра полной мощности*, имеющего *расчетную чувствительность* вместо стандартного подхода – *модуляционного радиометра (радиометра Дике)*.

2. Чувствительность радиоастрономических наблюдений при этом автоматически возросла вдвое. Это означает увеличение вдвое точности измерения параметров источников радиоизлучения.
3. Для слабых объектов, сигнал которых нужно накапливать, это означает уменьшение необходимого времени накопления в 4 раза.
4. При неизменных остальных параметрах радиотелескопа примерно втрое увеличивается количество источников, доступных для наблюдения.
5. Увеличение чувствительности радиометра сопровождается одновременным удешевлением схемы СВЧ-радиометра, поскольку *радиометр полной мощности* имеет самую простую (из всех возможных) конструкцию.
6. Кроме радиоастрономического применения, полученные результаты могут быть использованы и в других областях, например – в задаче дистанционного пассивного картографирования поверхности Земли, а также – в медицинской радиометрии.
7. Предложенная диссертантом (или аналогичная, построенная на предложенном принципе) прецизионная измерительная система для измерения сигналов СВЧ радиометров на постоянном токе, не вносящая в измеряемый сигнал собственных “дрейфов нуля”, может использоваться и в других областях, если требуются прецизионные измерения сигналов на постоянном токе (например - измерения сигналов датчиков физических величин).
8. Перспективны также дальнейшие поиск и устранение оставшихся источников нестабильности в радиометре полной мощности на более длинных временных масштабах, что может еще более расширить область практического применения таких радиометров.

Научное значение полученных результатов определяется тем, что результаты работы Системы Сбора Данных и Управления и ее развития диссертантом успешно используются в течение более 15 лет для получения новых данных в астрофизических исследованиях с личным участием автора [А5—А15;

В1—В10] и в сотнях других работ с применением ССДиУ радиометров континуума РАТАН-600 по таким направлениям, как исследования микроволнового фона Вселенной, галактических объектов, мгновенных спектров радиогалактик и квазаров, изучение радиоизлучения Солнца и планет Солнечной системы, спектральная наземная поддержка работ с космическим радиотелескопом (КРТ, проект “РадиоАстрон”, с 2011 г.) и многим другим. Один из программных элементов новой ССДиУ, а именно – программа сетевой визуализации наблюдений на радиометрах континуума РАТАН-600, была применена диссертантом при оперативной разработке специального комплекса программ “KRTVIZ”, предназначенной для сетевой визуализации сигналов всех радиометров КРТ в радиометрическом режиме. Этот комплекс успешно использовался в процессе летных испытаний КРТ в 2011-2012 гг. [3].

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена полным соответствием измеренных характеристик радиометров расчетным, с полным подтверждением в реальных радиоастрономических наблюдениях. Системы Сбора Данных и Управления, построенные на разработанном новом оборудовании, с начала 2013 года работают в штатных круглосуточных наблюдениях и показывают высокую точность и долговременную стабильность. В настоящее время 8 радиометров континуума РАТАН-600 переведены в режим *радиометра полной мощности* с одновременной установкой в них современных, коммерчески доступных детекторов, построенных с применением обращенных туннельных диодов. Эти радиометры работают в штатном режиме более года и демонстрируют на практике расчетную чувствительность *идеального радиометра полной мощности* на указанных временных интервалах.

Личный вклад автора в публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации суммированы в 15 научных статьях [А1—А15] в рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК. Все журналы и статьи на русском языке из [А1—А15] имеют их англоязычные рецензируемые версии, также удовлетворяющие требованиям ВАК. Работа [А1] выпол-

нена диссертантом самостоятельно. Остальные работы выполнены в соавторстве. Вклад диссертанта в работу [A2] является определяющим. Личный вклад в совместные работы [A3—A15] состоял в сопровождении и модернизации текущих систем регистрации данных радиоастрономических наблюдений, развитии, разработке или участии в разработке средств и методов измерений, участие в обработке и анализе полученных данных, обсуждении результатов.

Другие результаты по теме диссертации, в том числе полученные лично, представлены в 49 публикациях [B1—B49], из которых 5 статей опубликованы в научно-технических изданиях, 4 работы представляют собой технические отчеты САО РАН, 40 работ опубликованы в материалах отечественных и международных конференций.

В работе [A2] основная часть результатов получена лично диссертантом:

- изготовлен детектор на туннельном диоде;
- впервые в радиометрической практике обнаружен эффект резкого снижения шума $1/f$ в радиометре с детектором на туннельном диоде;
- показано, что радиометр с туннельным детектором на масштабах времени до 10 секунд имеет чувствительность *идеального радиометра полной мощности* (в 2 раза выше, чем в модуляционном режиме).

При участии коллектива соавторов обсуждались полученные результаты и произведен перевод 3-х радиометров континуума в режим *полной мощности*.

В работе [A3] вклад диссертанта состоял в полной интеграции систем помехоподавления в Систему Сбора Данных и Управления, развиваемую и сопровождаемую диссертантом, и в разработке методов обработки наблюдательного материала.

В работе [A4] диссертантом обеспечена регистрация данных с выходов фокальной матрицы радиометров, с применением оборудования и методик, разработанных в работе [A1], а также – разработка и реализация новых методик обработки наблюдений (программная балансировка радиометра с диаграммной модуляцией, анализ и учет аппаратурных эффектов).

В работах [A5–A7] диссертант выполнял оценки параметров флуктуаций радиоизлучения атмосферы, имеющих *спектральную плотность мощности*

(СПМ) вида A/f^α , с применением специально разработанного диссертантом программного обеспечения (ПО) для построения сглаженных оценок СПМ.

В работе [A8] диссертант обеспечил регистрацию данных во время солнечного затмения.

В работах [A9—A12; A14] диссертант принимал непосредственное участие как участник федерального проекта “Генетический Код Вселенной”, в том числе выполнял задачи по аппаратно-методическому обеспечению эксперимента и участвовал в обсуждении полученных результатов.

В работе [A15] личный вклад диссертанта состоял в участии в периодических спектральных измерениях на РАТАН-600 переменных квазаров и галактик, использующихся в качестве вторичных калибраторов по потоку при долговременном мониторинге основных параметров КРТ, в разработке и круглосуточном сопровождении новой системы регистрации радиоастрономических данных, повышении чувствительности приемников, обработке и анализе полученных данных и обсуждении результатов.

В основных результатах, выносимых на защиту, вклад диссертанта является определяющим.

Апробация работы

Материалы работы докладывались на Всероссийских радиоастрономических конференциях (25-й, Пущино, 1993 г., 26-й, С.-Петербург, 1995, 27-й, С.-Петербург, 1997), Всероссийских астрономических конференциях (2001 г., С.-Петербург, 2004 г., Москва, 2007 г., Казань, 2010 г., Нижний Архыз, 2013 г., Санкт-Петербург), Российской конференции памяти А.А. Пистолькорса “Радиотелескопы РТ-2002: антенны, аппаратура, методы” (2002 г., Пущино), на конференциях “Актуальные проблемы внегалактической астрономии”, Пущино, 2002, “Сахаровские осцилляции и радиоастрономия”, Нижний Архыз, 2007, Радиоастрономической конференции “Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов” памяти Н.А. Есепкиной (2008 г., Н. Архыз), на рабочих секциях ‘Cosmic Genome’, Нижний Архыз, 2000, и “Радиотелескопы и методы”, Москва, АКЦ ФИАН, 2006, на конкурсе научно-технических работ САО РАН (2014 г., 1-е место).

Полученные результаты обсуждались также на зарубежных конференци-

ях: на Европейских конференциях молодых радиоастрономов 28-th YERAC, Kapteyn Institute, Groningen, Netherlands, и 31-th YERAC, NRAO, Jodrell Bank. Также результаты докладывались на международных конференциях: Gamov Memorial International Conference “Early Universe: Cosmological Problems and Instrument Technologies”, St. Petersburg, 1999; 5-th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology, Kiev, 1995; “Cosmic Physics”, Nizhnij Arkhyz, 2007; на рабочей группе “RFI Mitigation Workshop”, 2010, Groningen, Netherlands.

Структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырех Глав, Заключения, трех Приложений и Списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 146 страниц и содержит 35 рисунков и одну таблицу. Библиография из 94 наименований содержит 12 страниц. Приложения А–С – 40 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приведена общая характеристика работы и ее актуальность.

В **Главе 1** представлены результаты работ с активным участием автора в задаче *частотно-временного помехоподавления*. Эта аппаратурно-методическая задача требовала разработки как специальных радиометрических узлов, так и оборудования, методов регистрации и обработки данных с целью подавления помех.

В середине 90-х годов на РАТАН-600 ощутимо ухудшилась помеховая обстановка в дециметровых диапазонах ($500 \div 2500 \text{ МГц}$), и было принято решение о проведении НИР по анализу электромагнитной обстановки в месте расположения радиотелескопа и внедрению аппаратуры и методов помехоподавления в этих диапазонах. Так был разработан и внедрен метод *частотно-временного помехоподавления*, основанный на последовательности стадий обработки сигналов:

1. *Анализ* (как противоположность *синтеза*) “широкой” рабочей полосы радиометра. *Анализ* производится аппаратно, с помощью банка СВЧ филь-

тров.

2. Высокоскоростная оцифровка сигнала в каждой из “узких” полос анализа.
3. Подавление импульсных помех в масштабе реального времени в каждой из полос анализа.
4. Отбраковка “узких” полос в случае, если помехи в них не удастся устранить полностью.
5. *Синтез* “широкой” полосы из очищенных от помех “узких” полос.

Задача активного импульсного помехоподавления (п. 2) решалась с помощью появившихся тогда новых средств *цифровой обработки сигналов* (ЦОС) – *цифровых сигнальных процессоров* (ЦСП).

Для ССДиУ (и круга задач автора в данной тематике) введение новых средств и методов означало:

1. необходимость высокоскоростной оцифровки сигналов радиометров на *постоянном токе* (в противоположность стандартному разностному приему, когда постоянная составляющая сигнала детектора обычно отсекается). При этом в *радиометре Дике* внешние помехи присутствуют в сигнале только в полупериод модуляции, когда входной переключатель радиометра (“Dicke switch”) подключен ко входу радиометра, и отсутствуют в полупериод, соответствующий полупериоду “Эквивалент”, когда входной переключатель подключен к источнику опорного шумового сигнала.
2. Необходимость интегрирования нового оборудования ЦОС в рабочий комплекс регистрации и управления.
3. Разработку алгоритмов цифровой режекции импульсных помех в ЦСП в масштабе реального времени.
4. Разработку алгоритмов пост-обработки данных радионаблюдений, включающей в себя синтез полной полосы каждого радиометра из набора “узких” очищенных от помех поддиапазонов.

Данная работа была важна и полезна также с методической точки зрения: применение ЦСП и высокоскоростная регистрация данных позволили реализовать режим т.н. *цифрового синхронного детектора* (ЦСД), в противоположность полностью *аналоговому синхронному детектированию* (АСД) сигналов модуляционных радиометров. ЦСД значительно расширяет возможности радиометра по перестройке режимов наблюдений и радиометрических измерений. Поэтому автор ввел ЦСД в качестве штатного режима синхронного детектирования сигналов модуляционных радиометров на РАТАН-600.

Таким образом, одновременно с развитием радиометрических систем развивается и совершенствуется Система Сбора Данных и Управления радиометров континуума, постоянно отражая новые требования и реализуя новые возможности радиометров.

В результате проведенных работ на РАТАН-600 были созданы и введены в работу 3 системы активного *частотно-временного* помехоподавления для диапазонов 13, 30 и 49 см. Это отражено в ряде научно-технических работ участников НИР [4; 5], а также в работах с личным участием автора [А3; В25—В28; В37; В40; В41; В43]. Применение данной технологии помехозащиты рабочих частот позволило в течение еще 15-ти лет проводить успешные наблюдения в дециметровых диапазонах на РАТАН-600, поэтому практически все исследовавшиеся спектры точечных радиоисточников и протяженных объектов содержали результаты измерений также и в длинноволновой области – вплоть до 1 ГГц, а иногда и до 500 МГц. Наблюдательные работы с личным участием автора отражены в публикациях [А8; А10; А11].

Глава 2 представляет работы диссертанта по разработке и внедрению в штатную работу системы сбора данных и управления нового поколения, предназначенной для наблюдений на комплексе радиометров континуума РАТАН-600 [6].

Модернизация приемных комплексов континуума РАТАН-600 характеризуется такими основными этапами, как реализации проектов:

1. “МАРС”, и его последовательных стадий “МАРС1”, “МАРС2 и “МАРС3” [А4; В29; В30; В34; В38; 7]. Окончательный этап проекта - ввод в работу комплекса “МАРС3”, представляющего собой фокальную 32-х рупорную матрицу из 16 радиометров диапазона 30 GHz (полоса 5 GHz).

2. “Октава” [B36] – широкополосный $500 \div 3000$ МГц дециметровый приемный комплекс с 3-мя перестраиваемыми диапазонами.
3. Двухканальный криорадиометр диапазона 6.2 см [8].
4. Неохлаждаемый многочастотный радиометрический комплекс диапазона 0.6–30 GHz (4 широкополосных радиометра на длины волн 1, 1.8, 3.5 и 6.2 см.). [B35].

Эти этапы отражены в научно-технических работах и докладах [A5; B28–B30; B33–B39; B42; 8], а также в астрофизических исследованиях с непосредственным участием автора – в работах [A1; A6–A11; B4] и в материалах конференций [A6; A7; B1; B2; B6; B8].

С вводом в работу новых приемных комплексов радиометров РАТАН-600 возникла необходимость обеспечить их (а также существовавшие на тот момент комплексы) системами сбора данных и управления. Новые комплексы располагаются в трех аппаратурных кабинах вторичных зеркал (“облучателей”) РАТАН-600 номер 1, 2 и 3. Существовавшая на тот момент (2005 год) [B19; 9] “старая” архитектура ССДиУ “облучателя тип 1” приводила к техническим сложностям ее тиражирования на других “облучателях” радиотелескопа (диссертант сопровождал и развивал ССДиУ комплекса радиометров континуума самостоятельно с 1996 года).

Исторически, в основе концепции “старой” архитектуры лежала оцифровка сигналов с помощью АЦП, находящегося внутри компьютера (одна или несколько плат АЦП, установленных на какой либо шине компьютера). Такой централизованный подход требовал подведения аналоговых сигналов от радиометров непосредственно к компьютеру, причем – на достаточно большие расстояния (до 30 метров). Это ухудшало помехоустойчивость передачи аналоговых сигналов. Кроме того, подсистема управления в “старой” архитектуре также была централизована путем подведения управляющих сигналов (калибровка, балансировка радиометров) от компьютера к каждому из радиометров. Такая архитектура имеет много недостатков, одним из которых являлась слабая *масштабируемость* Системы Сбора Данных и Управления: введение в работу новых радиометров могло превысить число аналоговых входов и линий управления, и требовались серьезные финансовые и трудозатраты для расширения

возможностей ССДиУ.

Положительный опыт построения систем активной помехозащиты дециметровых диапазонов РАТАН-600 показывал целесообразность децентрализации оцифровки сигналов радиометра, когда АЦП располагается в непосредственной близости к источнику сигнала – детектору радиометра. Кроме того, рядом с АЦП располагаются и устройства *цифровой обработки сигналов* (*цифровые сигнальные процессоры*) для высокоскоростной обработки в масштабе реального времени сигналов радиометров, а также – для управления радиометром. Данный подход можно назвать “интеллектуальный радиометр”. Обработанные самими радиометрами данные требуется передать в центральный сервер радиометрического комплекса, а также получить от сервера управляющие команды (например - команду калибровки). Для этого “интеллектуальный радиометр” должен иметь канал связи – Ethernet.

Этот подход привел к новой архитектуре ССДиУ, детально описанной в публикации автора [А1] и в Главе 3. В новой архитектуре особое внимание уделено устранению недостатков, присущих “старой” архитектуре.

В основе новой ССДиУ лежит концепция *встраиваемых систем* (*embedded systems*). ССДиУ стала модульной, встраиваемой в радиометры, легко наращиваемой (*масштабируемой*). Это позволило автору успешно решить задачу внедрения ССДиУ для новых радиометрических комплексов на вторичных зеркалах 1, 2 и 3. Модульность систем обеспечена разработкой и изготовлением требуемого числа “строительных блоков” ССДиУ – систем, названных автором “Embedded Radiometric Data Acquisition System”, кратко – ER-DAS. Из этих сетевых (Ethernet) “строительных блоков” строятся ССДиУ с требуемым числом измерительных каналов. Программное обеспечение ССДиУ остается при этом универсальным и единым для всех радиометрических комплексов. ССДиУ с такой архитектурой легко модернизируется, наращивается и тиражируется.

Одной из основных задач данной разработки являлось построение *измерительной системы*, которая вносит в измеряемый сигнал только минимально возможный белый шум. *Дисперсия* зарегистрированного шума *радиометра полной мощности* записывается в виде:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{white}^2 + \sigma_{1/f}^2 + \sigma_{white,LF}^2 + \sigma_{1/f,LF}^2, \quad (1)$$

где первые два слагаемых в правой части относятся к шуму радиометра, а

вторые два – к шуму *измерительной системы* (всему набору измерительных средств, установленных после *квадратичного детектора*). Задачи, решаемые автором в данной разработке – устранить последнее слагаемое в данной формуле ($\sigma_{1/f,LF}^2$) и, одновременно, минимизировать белую компоненту шума *измерительной системы* ($\sigma_{white,LF}^2$). Это позволит в дальнейшем исследовать компоненту $\sigma_{1/f}^2$ шума самого *радиометра полной мощности* с целью обнаружения ее источников и изучения возможности устранения их влияния. Поставленные здесь задачи были успешно решены: при разработке аналоговой части “строительных блоков” ER-DAS специальное внимание уделялось *дрейфу нуля УПТ* (*усилителей постоянного тока*). Именно применение УПТ лежит в основе новой *измерительной системы* радиометра. Диссертант применил в новой разработке новые прецизионные УПТ с *автокоррекцией нуля* – *auto-zero amplifiers*, имеющие минимально возможный на сегодняшний день уровень собственных шумов (для такого класса усилителей). Отличительной особенностью новой *измерительной системы* стал тот факт, что она практически не имеет собственного шума вида $1/f$. Теперь точность по постоянной составляющей определяется не шумом вида $1/f$ *операционных усилителей* (ОУ) НЧ части радиометра плюс температурный коэффициент ОУ, а только температурным коэффициентом *auto-zero* усилителей, который почти на 2 порядка лучше, чем у обычных ОУ. Более точно решенную автором задачу можно сформулировать так: *всякий раз, когда напряжение на выходе квадратичного детектора радиометра равно V , измерительная система должна показать именно это напряжение, с абсолютной погрешностью, более чем на 2 порядка меньшей, чем ранее.*

Таким образом, пересмотр архитектуры ССДиУ привел к построению новой архитектуры, гибкой, универсальной, сетевой, масштабируемой, и тиражируемой, на основе измерительных систем, свободных от шума вида $1/f$. Это позволило автору построить ССДиУ радиометрических комплексов континуума всех трех действующих вторичных зеркал РАТАН-600 с общим числом радиометров – 30. В настоящее время эти системы работают в штатном режиме наблюдений по всем наблюдательным программам (кроме солнечных).

В **Главе 3** показано применение новой *измерительной системы* в основных областях ее назначения: проведении штатных радиоастрономических наблюдениях и в радиометрических измерениях.

При проведении радионаблюдений новая *измерительная система* производит 2 сигнала модуляционного радиометра, соответствующие отдельным полупериодам модуляции. Фактически это 2 потока данных от отдельных *радиометров полной мощности*. Вычитание этих потоков в пост-обработке дает сигнал модуляционного радиометра. В другом случае, если остановлен входной переключатель радиометра (“Dicke switch”), полусумма этих 2-х потоков дает сигнал *радиометра полной мощности*. Таким образом, в реальных наблюдениях оказываются доступны оба режима измерений – “модуляционный” и “полной мощности” – без каких либо изменений в конструкции радиометра. Такой метод *синхронного детектирования* сигнала модуляционного радиометра назван автором “метод *отложенного цифрового синхронного детектирования*” (ОЦСД), и обеспечен алгоритмом, получившим название *radiometric digital Lock-In* (RDL). Назначение алгоритма RDL – высокоскоростное разделение в масштабе реального времени сигнала модуляционного радиометра на 2 сигнала, которые соответствуют двум полупериодам модуляции, с последующей их НЧ фильтрацией и *децимацией*. Алгоритм реализован в цифровом сигнальном процессоре. Показано применение данного подхода в наблюдениях на примере наблюдения точечного радиоисточника.

В результате успешного решения задачи устранения шума вида $1/f$ в *измерительной системе* формула (1) уже модифицирована:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{white}^2 + \sigma_{1/f}^2 + \sigma_{white,LF}^2 \quad . \quad (2)$$

Радиометрические измерения представлены задачей оценки параметров шума $1/f$ самого радиометра (оценки вклада слагаемого $\sigma_{1/f}^2$ в формулах (1) и (2)). Здесь источником шума $\sigma_{1/f}^2$ является только сам радиометр. Также предложена и детально изложена методика оценки данного вида шума, состоящая из известных и хорошо описанных методов. Однако *сама методика в целом, применимо к радиометру полной мощности, является новой* и представляется важной. Она позволяет с высокой степенью точности произвести оценку параметров шума радиометра вида A/f^α и является актуальной с точки зрения дальнейшей классификации получаемых пар A и α с целью *идентификации источников этого шума в радиометре*.

На примере *программной балансировки радиометра* показано, как ключевые особенности новой *измерительной системы* способны изменить (упростить)

схему *модуляционного радиометра* с одновременным повышением долговременной стабильности его работы.

В **Главе 4** представлены результаты работ по резкому снижению шума вида $1/f$ в *радиометре полной мощности*.

Ввод в штатную работу новой измерительной системы, у которой практически отсутствует шум вида $1/f$, позволил автору приступить к решению задачи поиска и устранения источников указанного шума в радиометре. При этом новые свойства измерительной системы дают полную уверенность в том, что измеряемый шум вида $1/f$ относится именно к радиометру, а не к *измерительной системе*. Выше упоминалось, что отсутствие шума $1/f$ в измерительной системе радиометра обусловлено применением новой элементной базы – прецизионных усилителей постоянного тока (УПТ) с непрерывной автокоррекцией нуля (auto-zero amplifiers). Так, например, в Главе 3 показано, что применение данного вида УПТ привело к резкому снижению *температурного дрейфа нуля* измерительной системы ($\sim 200 \mu K/^\circ C$), в то время как применение обычных УПТ дает недопустимо большие температурные дрейфы измерительной системы ($\sim 60 mK/^\circ C$, что в 300 раз хуже чем с *auto-zero* усилителями и более чем в $10 \div 60$ раз превосходит чувствительность современного радиометра). Такой недостаток обычных УПТ полностью устраняется в радиометре, построенном по модуляционной схеме. Однако, в радиометре полной мощности он полностью виден и должен быть минимизирован, что и сделано в новой *измерительной системе*.

Измерительная система подключается непосредственно к выходу квадратичного детектора радиометра. В то же время квадратичный детектор сам является потенциальным источником шума вида $1/f$, поэтому автором в работе [A2] была предпринята попытка выяснить вклад детектора в этот шум. Сделать это представлялось возможным только путем применения детектора, построенного на принципе, отличном от применяющихся обычно в настоящее время детекторов в радиометрах. В радиометре, выбранном для данного исследования, на выходе был установлен детектор с *низкобарьерным диодом с барьером Шоттки* (НДБШ). Автором был изготовлен и установлен в радиометр *детектор на обращенном туннельном диоде* (вместо НДБШ). Результат сравнительного анализа радиометров с разными типами детекторов приведен

на Рис. 1, и более детально – в работе [A2] и в Главе 4. Видно, что примене-

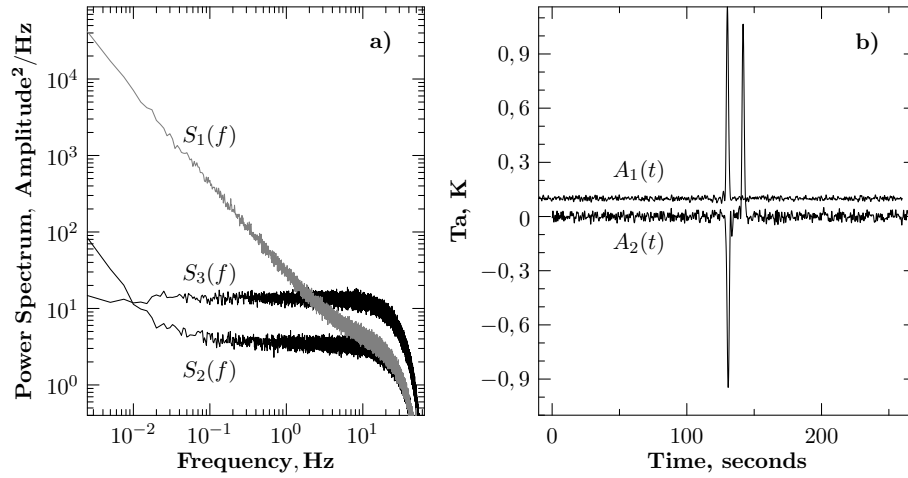


Рис. 1. **а)** – спектральные плотности мощности (СПМ) одного и того же радиометра. $S_1(f)$ – СПМ радиометра с детектором Шоттки. $S_2(f)$ – СПМ радиометра с туннельным детектором. $S_3(f)$ – СПМ радиометра с каждым из детекторов в модуляционном режиме. **б)** – пример наблюдения одного и того же радиоисточника одним и тем же радиометром: $A_1(t)$ – радиометр полной мощности с туннельным детектором; $A_2(t)$ – радиометр в модуляционном режиме (*beat-switching*) с каждым из детекторов. Результаты диссертанта из работы [A2].

ние детектора на обращенном туннельном диоде резко снижает шум вида $1/f$ в радиометре, что дает возможность проводить наблюдения с расчетной чувствительностью идеального радиометра полной мощности на значительных временных интервалах (до 10 и более секунд времени). Это новый результат, так как обычно считается, что за шум вида $1/f$ отвечают флуктуации усиления во всех СВЧ усилителях, а также - флуктуации коэффициента шума радиометра (см. например, [10]).

Необходимо отметить, что о детекторах на диодах Шоттки, как об источнике шума вида $1/f$, упоминалось и ранее, в работе разработчиков выходных частей радиометров 30 и 44 GHz космического проекта “Планк” [11]. Авторы отмечают (цитата): “The BEM low frequency power spectrum was characterized with a Hewlett Packard Vector Signal Analyzer HP81490A when a wave-guide matched load is connected to the input. The test was done at three temperatures: nominal (299 K), low (273 K) and high (326 K). The $1/f$ knee frequency was below 400 Hz in all BEM units, much lower than the phase switching of the FEM (4096 Hz), so gain fluctuations of the back-end module did not impact on the global performance of

the radiometer. The dominant $1/f$ noise source is attributed to the Schottky diode detector, since it refers directly to the diode current. The $1/f$ noise spectrum of each LNA alone was tested and the knee-frequency was about 13 Hz for the N-ON LNA and about 15 Hz for the N-OFF LNA. These results make evident that diode detector is mainly responsible for the knee-frequency of the BEM.” (конец цитаты). Однако задача устранения шума вида $1/f$ в проекте “Планк” решалась модуляционным способом приема (“псевдокорреляционной” схемой радиометра), поэтому задача устранения этого шума в режиме *радиометра полной мощности* не ставилась.

Интересно сравнить *значение частоты подъема в спектре мощности флуктуаций* на выходе радиометра в режиме *полной мощности*, полученное диссертантом, с современными данными в области СВЧ радиометрии в мире. Например, согласно [2], *спектральная плотность мощности* (СПМ) радиометра 44 GHz проекта “Планк” имеет подъем на частоте ~ 100 Hz. В то же время, в работе [A2] диссертант получил значение частоты подъема в СПМ ~ 0.1 Hz (см. Рис. 1(а)), что в ~ 1000 раз ниже по частоте (то есть – лучше) чем в предыдущем случае.

Если у радиометра *значение частоты подъема в СПМ* равно ~ 100 Hz (радиометр 44 GHz проекта “Планк”) – этот радиометр не целесообразно использовать в режиме *полной мощности*, поскольку он будет реализовывать расчетную чувствительность *идеального радиометра полной мощности* только на масштабах времени около 0.01 секунд и короче. Если же *значение частоты подъема в СПМ* равно ~ 0.1 Hz (кривая $S_2(f)$ на Рис. 1(а)) – такой *радиометр полной мощности* уже реализует расчетную чувствительность на масштабах 10 секунд и короче. Для наблюдения точечных радиоисточников на РАТАН-600 такой радиометр будет демонстрировать чувствительность, вдвое лучшую, чем в модуляционном режиме (см. Рис. 1(б)). *Средне-квадратичное отклонение* (СКО) шума равно интегралу под СПМ в заданном диапазоне частот. Поэтому интегрирование СПМ $S_2(f)$ в полосе с нижней граничной частотой 0.01 Hz даст меньшее СКО, чем интегрирование в той же полосе частот СПМ шума *модуляционного радиометра* $S_3(f)$, см. Рис. 1(а). Следовательно, наблюдения длительностью до 100 секунд таким *радиометром полной мощности* будут иметь более высокую чувствительность, чем наблюдения *модуляционным радиометром*.

В настоящее время 8 радиометров континуума РАТАН-600 переведены в

режим *радиометра полной мощности* с установкой в них современных, коммерчески доступных детекторов, построенных с применением обращенных туннельных диодов. Эти радиометры успешно работают в штатном режиме уже более года и демонстрируют на практике расчетную чувствительность *идеального радиометра полной мощности* на указанных временных масштабах.

В **Приложения** вынесен материал, имеющий методический интерес: применяя единый подход, получены основные соотношения, используемые в радиометрии, но зачастую “разбросанные” по разным источникам. Приведены теоретические и практические расчеты для основных схем радиометров, применяющихся на РАТАН-600.

В **Приложении А** описан *идеальный радиометр полной мощности*. Получено аналитическое выражение для спектральной плотности мощности сигнала на выходе безынерционного квадратичного детектора, уделено внимания некоторым важным соотношениям для сигнала и шума на выходе детектора *идеального радиометра полной мощности*, которые отсутствуют в стандартной литературе по СВЧ-радиометрии.

В **Приложении В** описан *реальный радиометр полной мощности*. Приведены вычисления для основных параметров схемы радиометра, таких как СВЧ-усиление, НЧ-усиление, динамический диапазон радиометра, динамический диапазон системы регистрации. Показаны особенности применения реального квадратичного детектора и НЧ-усилителей.

В **Приложении С** описан *модуляционный радиометр*. С помощью спектрального подхода получено отношение сигнал/шум в радиометре Дике для случая малого сигнала.

Необходимость вычислений, приведенных в приложениях, продиктована необходимостью знания и учета основных особенностей радиометрических схем, их сигналов и шумов в процессе разработки систем регистрации для указанных типов радиометров.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

- A1. *Цыбулев П. Г.* Система Сбора Данных и Управления нового поколения для проведения радиоастрономических наблюдений в континууме на радиотелескопе РАТАН-600: разработка, наблюдения, измерения // *Астрофизический бюллетень*. — 2011. — Т. 66(1). — С. 118—133.
- A2. *Цыбулев П. Г., Дугин М. В., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Кратов Д. В., Удовичкий Р. Ю.* Шум вида $1/f$ в радиометре полной мощности // *Астрофизический бюллетень*. — 2014. — Т. 69(2). — С. 256—262.
- A3. Противопомеховая активность на радиотелескопе РАТАН-600 / *П. Г. Цыбулев, А. Б. Берлин, Н. А. Нижельский, М. Г. Мингалиев, Д. В. Кратов* // *Астрофизический бюллетень*. — 2007. — Т. 62(2). — С. 208—217.
- A4. *Берлин А. Б., Парийский Ю. Н., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Цыбулев П. Г., Кратов Д. В., Удовичкий Р. Ю., Смирнов В. В., Пилипенко А.* Матричная Радиометрическая Система для РАТАН-600 МАРС-3 // *Астрофизический Бюллетень*. — 2012. — Т. 67(3). — С. 354—366.
- A5. *Семенова Т. А., Парийский Ю. Н., Цыбулев П. Г.* О требованиях к методам “просветления” атмосферы при наземных радиоастрономических наблюдениях фоновых радиоизлучений Вселенной // *Астрофизический бюллетень САО РАН*. — 2009. — Т. 64(2). — С. 196—204.

- A6. *Naselsky P., Novikov I., Parijskij Y., Tsibulev P.* CMB anisotropy and polarization measurements with RATAN-600 // International Journal of Modern Physics. — 1999. — Vol. 8, no. 5. — Pp. 581–605.
- A7. *Jorgensen H. E., Novikov I. D., Kotok E. V., Naselsky P. D., Naselsky I. P., Vasil'ev E. V., Parijskij Y., Tsibulev P.* The Cosmological Gene Project: cluster analysis of the atmospheric fluctuations on arcmin-scale imaging of the cosmic microwave background // International Journal of Modern Physics. — 2000. — Vol. 9(2). — Pp. 127–142.
- A8. *Богод В. М., Голубчина О. А., Жеканис Г. В., Коржавин А. Н., Котельников В. С., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г.* Исследование северной полярной области Солнца по микроволновым наблюдениям полного затмения Солнца // Астрофизический Бюллетень. — 2007. — Т. 62(4). — С. 360–368.
- A9. *Парийский Ю. Н., Бурсов Н. Н., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Цыбулев П. Г., Богданцов А. В., Майорова Е. К., Пилипенко О. М., Балановский А. А., Жеканис Г. В.* Исследование Юпитера с высоким разрешением на частоте 30 ГГц // Письма Астрон. ж. — 2000. — Т. 30(4). — С. 315–320.
- A10. *Парийский Ю. Н., Бурсов Н. Н., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Богданцов А. В., Цыбулев П. Г.* Макромолекулы в галактике и реликтовое радиоизлучение Вселенной // Астрономический Журнал. — 2002. — Т. 79(7). — С. 583–588.
- A11. *Parijskij Y. N., Bursov N. N., Berlin A. B., Balanovskij A. A., Khaikin V. B., Majorova E. K., Mingaliev M. G., Nizhelskij N. A., Pylypenko O. M., Tsibulev P. G., Verkhodanov O. V., Zhekanis G. V., Zverev Y. K.* RATAN-600 new zenith field survey and CMB problems // Gravitation & Cosmology. — 2005. — Vol. 11. — Pp. 139–144.
- A12. *Парийский Ю. Н., Мингалиев М. Г., Нижельский Н. А., Бурсов Н. Н., Берлин А. Б., Гречкин А. А., Жаров В. И., Жеканис Г. В., Майорова Е. К., Семенова Т. А., Столяров В. А., Цыбулев П. Г., Кратов Д. В., Удовицкий Р. Ю., Хайкин В. Б.* Многочастотный обзор по фоновым излучениям Вселенной. Проект "Генетический код Вселенной". Первые ре-

зультаты // *Астрофизический Бюллетень*. — 2011. — Т. 66(4). — С. 453—466.

- A13. *Столяров В. А., Парийский Ю. Н., Бурсов Н. Н., Мингалиев М. Г., Семенова Т. А., Цыбулёв П. Г.* Наблюдения мелкомасштабных флуктуаций галактического излучения на радиотелескопе РАТАН-600 // *Астрофизический Бюллетень*. — 2012. — Янв. — Т. 67(1). — С. 31—47.
- A14. *Парийский Ю. Н., Бурсов Н. Н., Берлин А. Б., Мингалиев М. Г., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г., Семенова Т. А.* Обзор околосенитной области неба на частоте 30 ГГц с 32-элементной матрицей радиометров РАТАН-600 // *Астрофизический Бюллетень*. — 2013. — Т. 68(2). — С. 249—256.
- A15. *Ковалев Ю. А., Васильков В. И., Попов М. В., Согласно В. А., Войцук П. А., Лисаков М. М., Кутькин А. М., Николаев Н. Я., Нижельский Н. А., Жеканис Г. В., Цыбулев П. Г.* Проект РадиоАстрон. Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011—2013 гг. // *Космические исследования*. — 2014. — Т. 52(5). — С. 1—10.

Другие публикации автора по теме диссертации

- B1. *Ковалев Ю. А., Ковалев Ю. Ю., Нижельский Н. А., Коновалов Ю. Н., Берлин А. Б., Жеканис Г. В., Черненко В. Н., Цыбулев П. Г., Богданцов А. В., Мингалиев М. Г.* Первые результаты 13-18 частотных измерений мгновенных радиоспектров 600 компактных внегалактических объектов в апреле 1998 года // *Актуальные проблемы внегалактической астрономии*, изд. ПРАО АКЦ ФИАН. — Пущино, 1998. — С. 34.
- B2. *Parijskij Y. N., Tsyboulev P. G.* Limit on the Ground-Based CMBA Experiments // *In Proceedings of GMIC'99*. — St. Petersburg, 1999.
- B3. *Tsyboulev P. G.* Atmosphere foreground in the RATAN-600 CMB investigation // *In proceedings of 31 Young European Radio Astronomers Conference*. — NRAO Jodrell Bank, Aug. 1999.

- B4. *Parijskij Y., Tsiboulev P.* Limit on ground-based CMBA experiments // *Astronomical and Astrophysical Transactions.* — 2000. — Vol. 19(3). — Pp. 287–295.
- B5. *Pariskij Y., Bursov N., Nizhelskij N., Berlin A., Bogdantsov A., Tsibulev P.* CMBA and Spinning dust problem // Workshop “Cosmic Genome” / ed. by Y. Parijskij. — 2000.
- B6. *Парийский Ю. Н., Бурсов Н. Н., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г., Богданцов А. В., Берлин А. Б.* Поиск “Окна” в Раннюю Вселенную // ВАК-2001. Тезисы докладов. — С.-Петербург, 2001. — С. 140.
- B7. *Мингалиев М. Г., Кононов В. К., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г., Богданцов А. В., Трушкин С. А., Жеканис Г. В., Бурсов Н. Н., Парийский Ю. Н., Ларионов М. Г., Амирханян В. Р., Горшков А. Г., Ковалев Ю. Ю., Соболева Н. С., Темирова А. В.* О космологическом архиве данных РАТАН-600 // Актуальные проблемы внегалактической астрономии. — Пущино, 2002.
- B8. *Парийский Ю. Н., Бурсов Н. Н., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Цыбулев П. Г., Богданцов А. В., Майорова Е. К., Балановский А. А., Жеканис Г. В.* Исследование Юпитера с высоким угловым разрешением на частоте 30 ГГц // Тез. докл. Всерос. астрон. конф. ВАК-2004 “Горизонты Вселенной”. — Москва, 2004. — С. 62.
- B9. *Ковалев Ю. А., Ковалев Ю. Ю., Жеканис Г. В., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г.* Внегалактические релятивистские струи по совместным исследованиям на телескопах РАТАН-600, VLBA и FERMI // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013. — 2013.
- B10. *Ковалев Ю. А., Берлин А., Ковалев Ю. Ю., Нижельский Н. А., Жеканис Г. В., Богданцов А., Цыбулев П. Г.* 100 квазаров и галактик: сильная долговременная переменность мгновенных широкодиапазонных спектров радиоизлучения по 10-летним измерениям на 6 частотах от 1 до 22 ГГц на РАТАН-600 // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013. — 2013.

- B11. *Majorova E. K., Nizhel'sky N. A., Troushkin S. A., Tcibulyov P. G.* A study of characteristics of the RATAN-600 radio telescope equipped with anti-noise screens // *Astrofiz. Issled.(Izvest.SAO)*. — 1990. — Vol. 5. — Pp. 18–27.
- B12. *Zhekanis G. V., Kononov V. K., Mingaliev M. G., Tsybulev P. G.* USSR - the Project of a Complex for Automatization of Preparing and Making Observation at the Radio Telescope RATAN-600 // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* — 2003. — Vol. 55. — P. 133.
- B13. *Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г., Лебедь В. И., Пулипенко А. М.* Входной криоблок диапазона 2,7 см. на транзисторных усилителях типа НЕМТ для РАТАН-600 // Сб. тезисов докл. 25-й радиоастрономической конференции. — Пущино, 1993.
- B14. *Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Ловкова И. М., Тимофеева Г. М., Цыбулев П. Г., Гудзь Ю. Д.* Комплекс радиометров континуума РАТАН-600 нового поколения // Сб. тезисов докл. 25-й радиоастрономической конференции. — Пущино, 1993.
- B15. *Нижельский Н. А., Майорова Е. К., Трушкин С. А., Цыбулев П. Г.* Шумовая температура антенны РАТАН-600 с противозумовыми экранами // Сб. тезисов докл. 25-й радиоастрономической конференции. — Пущино, 1993.
- B16. *Верходанов О. В., Кононов В. К., Майорова Е. К., Цыбулев П. Г.* Разработка формата записи данных: РАТАН-FLEX: тех. отч. ; SAO RAS. — 1994.
- B17. *Верходанов О. В., Черненко В. Н., Кононов В. К., Трушкин С. А., Цыбулев П. Г.* Описание формата записи многочастотных данных RFLEX, приходящих с широкополосных приемников 1-ого облучателя РАТАН-600: тех. отч. ; SAO RAS. — 1995.
- B18. *Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г.* Применение усилителей на НЕМТ-транзисторах в радиометрах континуума на РАТАН-600 // Сб. тезисов докл. 26-й радиоастрономической конференции. — С.-Петербург, 1995.

- B19. Черненко В. Н., Цыбулев П. Г. Многопользовательская система сбора наблюдательных данных для радиометров непрерывного спектра на РАТАН-600 // Сб. тезисов докл. 26-й радиоастрономической конференции. — С.-Петербург, 1995. — С. 389—390.
- B20. Berlin A. B., Chmil V. M., Gloukhova E. N., Gol'nev V. Y., Goudz Y. D., Il'in G. N., Kabakov L. T., Ksenzenko P. Y., Lebed V. I., Lesovoy V. Y., Lovkova I. M., Maksiasheva A. A., Moushkin Y. N., Nazarenko L. S., Narytnik T. N., Nizhel'sky N. A., Pilipenko A. M., Pinchouk G. A., Potienko V. P., Prozorov V. A., Romanenko Y. N., Sankin V. A., Timofeeva G. M., Tcibulyov P. G., Venger A. P. SRI 'SATURN' and RATAN-600: twenty years of collaboration in microwave receivers design for radio astronomy // Proc. of the 5th International Symposium on Recent Advances in Microwave Technology. — Kiev, 1995.
- B21. Верходанов О. В., Кононов В. К., Цыбулев П. Г., Черненко В. Н. Формат записи многочастотных континуальных данных на выходе системы регистрации РАТАН-600 // XXVI Радиоастрономическая конференция. Тезисы докл. — С.Петербург, сент. 1995. — С. 316—317.
- B22. Черненко В. Н., Верходанов О. В., Витковский В. В., Малькова Г. А., Мингалиев М. Г., Пляскина Т. А., Трушкин С. А., Цыбулев П. Г. MCOSS-U - мобильная многопользовательская система поддержки наблюдения на радиометрах непрерывного спектра радиотелескопа РАТАН-600: тех. отч. ; SAO RAS. — 1995. — С. 10—24.
- B23. Tcibulyov P. G. Continuum radiometers of the RATAN-600 radio telescope. Sensitivity limit problems // In Proceedings of 28 Young European Radio Astronomers Conference. — Kapteyn Institute, Groningen, Netherlands, Sept. 1995. — Pp. 18—21.
- B24. Верходанов О. В., Кононов В. К., Цыбулев П. Г., Черненко В. Н. Формат записи многочастотных континуальных данных на выходе системы регистрации РАТАН-600 // XXVI Радиоастрономическая конференция. Тезисы докл. — С.Петербург, сент. 1995. — С. 316—317.

- В25. Берлин А. Б., Булаенко Е. В., Гольнев В. Я., Ловкова И. М., Нижельский Н. А., Тимофеева Г. М., Тузенко С. В., Фридман П. А., Цыбулев П. Г. Противопомеховая приставка к радиометру РАТАН-600 на волну 13 см. // Сб. тезисов докл. 27-й радиоастрономической конференции. — С.-Петербург, 1997. — С. 158—159.
- В26. Столяров В. А., Цыбулев П. Г. Методика и программное обеспечение обработки данных цифровых систем помехоподавления на РАТАН-600 // Сб. тезисов докл. 27-й радиоастрономической конференции. — С.-Петербург, 1997. — С. 182—183.
- В27. Берлин А. Б., Максяшева А. А., Нижельский Н. А., Пилипенко А. М., Цыбулев П. Г. Комплекс радиометров сплошного спектра РАТАН-600. Завершение этапа реконструкции // В сб.: Проблемы современной радиоастрономии, 27-я радиоастрономическая конференция. — Санкт-Петербург, 1997. — С. 115—116.
- В28. Berlin A. B., Nizhelsky N. A., Friedman P. A., Timofeeva G. M., Chmil' V. M., Pylypenko O. M., Tsiboulev P. G. RATAN-600 multifrequency focal plane receiver array for separation of the CMBA from screen effects // In Proceeding of Gamov Memorial International Conference "Early Universe: Cosmological Problems and Instrument Technologies". — St-Peterburg, 1999.
- В29. Нижельский Н. А., Берлин А. Б., Тимофеева Г. М., Парийский Ю. Н., Богданцов А. В., Цыбулев П. Г., Пилипенко А. М. Радиометрический модуль на основе ММИС-технологии ("МАРС"): первые результаты исследования макета на РАТАН-600 // ВАК-2001. Тезисы докладов. — С.-Петербург, 2001. — С. 133.
- В30. Берлин А. Б., Тимофеева Г. М., Богданцов А. В., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г., Мингалиев М. Г., Парийский Ю. Н., Пилипенко А. М., Балановский А. А. Приемная решетка диапазона 1 см на основе модулей "МАРС": поиск оптимального решения // Тез. докл. Конф. РТ-2002. — Пущино, 2002. — С. 22.
- В31. Жеканис Г. В., Кононов В. К., Мингалиев М. Г., Цыбулев П. Г. Проект комплекса автоматизации подготовки и проведения наблюдений на

радиотелескопе РАТАН-600 // Тез. докл. Конф. РТ-2002. — Пущино, 2002. — С. 47.

- В32. *Жеканис Г. В., Кононов В. К., Мингалиев М. Г., Цыбулев П. Г.* Концепция USS-комплекса автоматизации подготовки и проведения наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600: тех. отч. ; SAO RAS. — 2002. — С. 27.
- В33. *Цыбулев П. Г.* Цифровая Обработка Сигналов при наблюдениях в континууме на РАТАН-600 // Работа секции “Радиотелескопы и методы”. — 2006.
- В34. *Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Цыбулёв П. Г., Кратов Д. В., Смирнов В. В., Пилипенко О. М.* Матричная радиометрическая система для РАТАН-600 "МАРС-3": пробные наблюдения // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. — 2007.
- В35. *Богод В. М., Мингалиев М. Г., Цыбулев П. Г.* Неохлаждаемый высокочувствительный радиометрический комплекс РАТАН-600 в диапазоне 0.6-30 ГГц // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. — 2007.
- В36. *Берлин А. Б., Парийский Ю. Н., Мингалиев М. Г., Цыбулёв П. Г., Тимофеева Г. М., Кратов Д. В.* Модернизация радиометров дециметрового диапазона РАТАН-600: проект "Октава" // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. — 2007.
- В37. *Цыбулёв П. Г., Берлин А. Б., Парийский Ю. Н., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Кратов Д. В., Удовичкий Р. Ю.* Сбор данных и противопомеховая активность на радиотелескопе РАТАН-600 // Труды всероссийской астрономической конференции ВАК-2007. — 2007.
- В38. *Berlin A. B., Nizhelsky N. A., Mingaliev M. G., Tsiboulev P. G., Kratov D. V.* The "MARS-3" Matrix Radiometric System for RATAN-600 Radio Telescope: Trial Observations // The International Conference «Cosmic Physics». — 2007.

- В39. Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Цыбулёв П. Г., Кратов Д. В. Аппаратура и методика многочастотных наблюдений микроволнового фона на РАТАН-600 // Международная конференция “Сахаровские осцилляции и радиоастрономия”. — 2007.
- В40. Цыбулёв П. Г., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Кратов Д. В., Удовецкий Р. Ю. Проблемы помехозащиты рабочих диапазонов РАТАН-600 // Международная конференция “Сахаровские осцилляции и радиоастрономия”. — 2007.
- В41. Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Цыбулёв П. Г., Кратов Д. В., Удовецкий Р. Ю., Смирнов В. В., Пилипенко О. М. Современное состояние и перспективы матричных радиометров на РАТАН-600 // Международная конференция “Сахаровские осцилляции и радиоастрономия”. — 2007.
- В42. Цыбулев П. Г. О чувствительности радиометров континуума // Труды Всероссийской конференции “Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России”. — 2008.
- В43. Kratov D. V., Berlin A. B., Nizhelskij N. A., Tsybulev P. G., Mingaliev M. G., Udovitskiy R. Y. Techniques for excision RFI on RATAN-600 radio telescope in dm ranges // Proceedings of the RFI Mitigation Workshop. — 2010.
- В44. Кратов Д. В., Берлин А. Б., Нижельский Н. А., Цыбулев П. Г., Удовецкий Р. Ю. Помеховая обстановка на радиотелескопе РАТАН-600 и перспективные методы подавления помех // Труды ИПА РАН. — 2012. — Т. 24. — С. 222.
- В45. Кратов Д. В., Цыбулев П. Г., Нижельский Н. А., Удовецкий Р. Ю. Исследование возможности применения адаптивной фильтрации для чистки помех на РАТАН-600: первые результаты // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013. — 2013.
- В46. Нижельский Н. А., Кратов Д. В., Берлин А. Б., Цыбулев П. Г., Удовецкий Р. Ю. Радиометры континуума РАТАН-600: от “водорода” к “теплу” // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013. — 2013.

- В47. *Удовицкий Р. Ю., Цыбулев П. Г., Нижельский Н. А., Мингалиев М. Г., Сотникова Ю. В., Кратов Д. В., Ковалев Ю. А.* Автоматизация мониторинга параметров радиотелескопа РАТАН-600 по наблюдениям калибровочных источников // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013. — 2013.
- В48. *Цыбулев П. Г., Нижельский Н. А., Берлин А. Б., Кратов Д. В., Удодвицкий Р. Ю.* Система сбора данных и управления для наблюдений в континууме на РАТАН-600: завершение модернизации // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013. — 2013.
- В49. *Цыбулев П. Г., Нижельский Н. А., Берлин А. Б., Кратов Д. В., Удодвицкий Р. Ю.* Шум вида $1/f$ в радиометре // Труды Всероссийской астрономической конференции ВАК-2013. — 2013.

Цитируемая литература

1. *Dicke R. H.* The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies // Review of Scientific Instruments. — 1946. — Vol. 17, no. 7. — Pp. 268–275. — DOI: 10.1063/1.1770483.
2. *Meinhold P.* [et al.] Noise Properties of the Planck-LFI Receivers // Journal of Instrumentation. — 2009. — Vol. 12. — T12009.
3. *Кардашев Н. С.* [и др.] “РАДИОАСТРОН” – телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрономический журнал. — 2013. — Т. 90(3). — С. 179–224.
4. *Berlin A. B., Friedman P. A.* Real Time Radiometric Data Processing against Electromagnetic Pollution. // 25-th General Assembly of the International Union of Radio Science. — Lille, France, 1996. — P. 750.
5. *Fridman P. A., Bulaenko E. V., Tuzenko S. V.* // Proceedings of the First International Conference and Exhibition, Digital Signal Processing and its Applications. — 1998. — Vol. III-E. — Pp. 55–66.

6. *Нижелский Н.* Комплекс высокочувствительных криогенных радиометров сплошного спектра для глубоких обзоров и других астрофизических задач на РАТАН-600: дис. . . . канд. физ.-мат. наук / Нижельский Н.А. — Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 1992.
7. <http://www.sao.ru/hq/lrk/index.html.en> / Laboratory of Continuum Radiometers SAO RAS.
8. *Нижелский Н. А., Балановский А. А., Карабашев Б. И., Берлин А. Б., Пилипенко А. М.* Двухканальный криорадиометр РАТАН-600 диапазона 6.3 см: первый опыт эксплуатации. // Тезисы докладов на Всероссийской астрономической конф. ВАК-2004 “Горизонты Вселенной”. — ГАИШ МГУ, 2004. — С. 26.
9. *Черненко В. Н.* Комплекс средств развития многоуровневой территориально-распределенной системы сбора и обработки данных радиотелескопа РАТАН-600: дис. . . . канд. физ.-мат. наук / Черненко В. Н. — Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 1996.
10. *Wollack E. J.* High-electron-mobility-transistor gain stability and its design implications for wide band // Review of Scientific Instruments. — 1995. — Vol. 66. — Pp. 4305–4312.
11. *Artal E.* [et al.] LFI 30 and 44 GHz receivers Back-End Modules // Journal of Instrumentation. — 2009. — Vol. 12. — T12003.

Бесплатно

Заказ № 195с

Уч. изд. л. – 2.0

Тираж 100

САО РАН