

УТВЕРЖДАЮ

проректор МГУ имени М.В.Ломоносова



профессор А.А.Федянин

(подпись и гербовая печать МГУ)

« 9 » декабря 2014 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

(МГУ имени М.В.Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1)

на диссертационную работу Цыбулева Петра Григорьевича

“Развитие систем регистрации радиоастрономических данных и повышение чувствительности радиотелескопа РАТАН-600”, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Актуальность темы

Актуальность работы определяется стремлением астрономов исследовать все более слабые объекты. Для решения этих задач методами математической статистики часто требуется использование алгоритмов, основанных на результатах длительных наблюдений и экспериментов, когда обрабатываются выборки случайного процесса за большой интервал времени. Существенным ограничивающим фактором при использовании таких алгоритмов обработки является нестационарность сигнала, например, при воздействии фликкер-шума.

Автор исследовал один из способов повышения чувствительности – снижение низкочастотных шумов и, следовательно, повышение стабильности приемной системы. Актуальной составляющей такой работы остается разработка методов борьбы с растущими техногенными радиочастотными помехами.

Научная новизна

Развитие СВЧ-радиоэлектроники позволило астрономам приблизиться к теоретической чувствительности радиотелескопов. Однако, такого же прогресса в подавлении низкочастотных шумов и нестабильностей не произошло. Борьба с ними ведется традиционными с 1946 г. модуляционными методами, с неизбежной потерей чувствительности. Автор диссертации предложил другой способ значительного уменьшения шумов низкочастотного блока радиометра, заменив в качестве квадратичного детектора СВЧ мощности общепринятого сегодня диода с

барьером Шоттки на обращенный туннельный диод. В результате низкочастотный подъем шумов радиометра сместился в диапазон ниже 0.1 Гц. Полученные результаты привели автора к мысли вернуться к схеме компенсационного радиометра, от которой отказались на заре радиоастрономии: реальная чувствительность этой схемы все эти годы оставалась на порядки хуже расчетной. Однако, компенсационная схема привлекательна простотой и меньшими шумами, которые в два раза ниже, чем у модуляционной схемы (для идеальных приемников). Автор сумел одним из первых в мировой практике реализовать расчетные шумы компенсационной схемы, современная версия которой называется “радиометр полной мощности”.

Практическое значение

1. Разработка схемы сбора данных, которая позволяет на аппаратном и программном уровне реализовать идею “радиометра полной мощности”, а также позволяет оперативно изменять режим работы радиометра, оперативно информировать систему о состоянии радиометра, оперативно “вырезать” импульсные помехи.
2. Повышение чувствительности радиотелескопа, как минимум, в два раза, а следовательно, увеличение числа объектов, доступных наблюдениям.
3. Оснащение СВЧ-блоков разработанными схемами, соединение их линией Ethernet и объединение общим программным пространством превратило РАТАН-600 в единый измерительный комплекс.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, трех приложений и библиографии.

Обсуждение диссертации

Во введении автор описал современное состояние радиоастрономических приемных систем, задачи, стоящие перед разработчиками, а также растущий антагонизм между чувствительностью и помеховой обстановкой, порождаемый бурным развитием радиоэлектроники.

В первой главе показано ухудшение помеховой обстановки в районе РАТАН-600 от дециметрового диапазона (автомобили, релейные линии связи, мобильная связь...) до сантиметровых волн (спутники, радиолокаторы...). Правда следует отметить, что радиоастрономы сами зачастую нарушают конвенцию о распределении частот в стремлении увеличить чувствительность радиотелескопов за счет расширения полосы приема.

Показано, что важнейшим условием успешной работы защитных схем является быстрая оцифровка сигнала и дальнейшая оперативная его обработка программными средствами. При участии автора были разработаны несколько вариантов противопомеховых схем, которые

позволяют продолжать наблюдения даже при очень сложной помеховой обстановке.

В начале 90-гг прошлого столетия становится очевидным, что только цифровые низкочастотные блоки позволяют полностью реализовать потенциальную чувствительность СВЧ радиометров.

Разработчики СВЧ-элементов достигли выдающихся успехов в понижении собственных шумов СВЧ-приемников. В тоже время низкочастотные блоки широкополосных радиометров серьезных изменений не претерпели ни функционально, ни по своим параметрам. На это не повлияли ни смена элементной базы, ни частичный переход к цифровой технике. Это утверждение автора не вполне соответствует реальности. С середины 60-х годов прошлого столетия стали активно развиваться и внедряться в инженерную практику диодные детекторы СВЧ мощности, основанные на новых принципах преобразования сигнала и новой элементной базе. В настоящее время общепризнано, что для детектирования слабых СВЧ сигналов наиболее перспективным является использование обращенных диодов, диодов с сильно-легированными слоями и диодов с планарно-легированными барьерами (ДПЛБ), работающих без источника смещения и изготовленных по технологии молекулярно-лучевой эпитаксии. Разрабатывая новую схему для широкополосных радиометров РАТАН-600, автор опирался на реальные наблюдения на РАТАН-600. Анализ источников шума и нестабильностей привел его к идее заменить традиционный ПУНЧ на прецизионный усилитель постоянного тока. Плодотворная идея и ее грамотная реализация, в сочетании с естественным переводом аналога в цифру резко улучшили шумовые параметры и функциональные возможности низкочастотного блока радиометра. Во-первых, низкочастотные шумы “съехали” вниз по частоте на полтора – два порядка, наклон спектра шумов стал меньше 1 и интеграл по спектру стал сходящимся. Во вторых, появилась возможность вернуться к самой простой и самой малошумящей (в принципе) схеме компенсационного радиометра. Стабильность схемы оказалось столь высока, что позволяет при работе в модуляционном режиме, убирать входной разбаланс программным способом. Следовательно, можно отказаться от балансирующего устройства на входе радиометра, которое добавляет нестабильность и шум. Такое упрощение особенно актуально при размещении “многоствольной” приемной аппаратуры на фокальной линии антенны.

Параметры новой низкочастотной схемы позволили автору использовать ее для изучения реальных шумов СВЧ-блока. Результат этой части работы очень интересен. Автор определил, что шумовые параметры диода с барьером Шоттки, который используют в радиометрии более 30 лет, существенно хуже, чем у обращенного туннельного диода. Отмечается, что впервые обнаружен эффект

уменьшения $1/f$, но это свойство детекторов на ОТД известно с 80-х годов прошлого века.

Возможно такая разница шумов определяется не только туннельным переходом, но и самим диодом Шоттки. Автор приводит параметры таких диодов в проекте “Планк”, у которых knee-frequency располагается вблизи 100 Гц. К сожалению, автор не приводит коэффициент передачи туннельного диода и его динамический диапазон, которые он получил в процессе исследований.

Таким образом, использование нового квадратичного детектора и новой низкочастотной схемы дало возможность реализовать расчетную чувствительность компенсационного радиометра на временах 10 – 100 сек. Отмечу, что в работе «Высокочувствительный компенсационный радиометр для радиотелескопа РТ-70» авторы Фалькович И.С. и др. (радиофизика и радиоастрономия т.3 № 3 1998г.) приведены результаты разработки радиометра полной мощности, где реализован теоретический предел чувствительности на масштабах времени около 10 с.

Опираясь на свой успешный опыт разработки и эксплуатации противополюсовых схем, автор принял очень современное решение: строить распределенную систему, универсальные модули которой встраиваются непосредственно в радиометр.

Такая архитектура дает серьезные преимущества перед системами, в которых все управление осуществляется из одного центра:

1. Радиометр становится законченной измерительной системой, самостоятельно контролирующей свою работу с помощью программного обеспечения встроенных микроконтроллеров.
2. ЭВМ, управляющая наблюдательным комплексом РАТАН-600, освобождается от мелкой рутинной опеки многочисленных радиометров, резко сокращается количество “длинных” коммуникаций.
3. Унификация модулей упрощает их изготовление, эксплуатацию, ремонт и расширение комплекса.

И такую архитектуру автор сумел создать и внедрить в реальные наблюдения на РАТАН-600. Результаты этих наблюдений являются главным подтверждением достоверности результатов данной работы. В настоящее время восемь радиометров РАТАН-600 переведены в режим “радиометра полной мощности” и в течении года демонстрируют расчетные чувствительность и стабильность. Также достоверность результатов подтверждена их апробацией на российских и международных конференциях 2001 – 2013 гг.

Результаты диссертации, выносимые на защиту, автор опубликовал в четырнадцати работах в рецензируемых журналах из списка ВАК. Из опубликованных работ и из самой диссертации видно, что автор

хорошо понимает предмет исследований, умеет находить нетривиальные решения и относится к малочисленной плеяде универсалов. Диссертация написана хорошим литературным языком, почти без профессионального сленга, с четким и логически связанным изложением.

Каждая глава заканчивается выводами, что улучшает восприятие диссертации.

Кажутся избыточными обширные по объёму приложения, которые содержат в основном выводы давно известных формул чувствительности идеальных радиометров и описания известных устройств -- ЦСД, модулирующие сигналы и т.п. Много излишне подробных описаний известных устройств и в основных разделах диссертации.

Оформление диссертации полностью соответствует требованиям ВАК. Автореферат и публикации соискателя в полной мере отражают главные положения и выводы диссертации.

Учитывая все вышеизложенное, считаем, что диссертационная работа "Развитие систем регистрации радиоастрономических данных и повышение чувствительности радиотелескопа РАТАН-600" полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Цыбулев Петр Григорьевич, заслуживает присуждения ему степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Отзыв на диссертационную работу Цыбулева П.Г. обсужден и одобрен на заседании Координационного Совета ГАИШ МГУ по астрофизике 26 ноября 2014 года, протокол № 82.

Отзыв составил

Старший научный сотрудник ГАИШ МГУ

кандидат физ.-мат. наук



А.Г. Горшков

Председатель координационного
совета ГАИШ МГУ по астрофизике,

доктор физ.-мат. наук



Г.М. Рудницкий

Заместитель директора ГАИШ МГУ,

доктор физ.-мат. наук



С.А.Ламзин

(Печать ГАИШ МГУ)