

“Утверждаю”

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук
член-корр. РАН
доктор ф.-м. наук Ю.Ю. Балсга

“ 2 ” июля 2014 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОРГАНИЗЦИИ, в которой выполнена диссертация

Выписка из протокола астрофизического семинара САО РАН от 2 июля 2014 г.
Присутствовали: 25 научных сотрудников, в том числе:

д.ф.-м.н. Афанасьев В.Л.,
к.ф.-м.н. Бурсов Н.Н.,
к.ф.-м.н. Валявин Г.Г.,
д.ф.-м.н. Верходанов О.В.,
д.ф.-м.н. Войханская Н.Ф.,
к.ф.-м.н. Глаголевский Ю.В.,
к.ф.-м.н. Кайсин С.С.,
к.ф.-м.н. Кайсина Е.И.,
к.ф.-м.н. Мингалиев М.Г.,
д.ф.-м.н. Моисеев А.В.,
к.ф.-м.н. Опейкина Л.В.,
к.ф.-м.н. Нижельский Н.Н.,
д.ф.-м.н., академик РАН, Парийский Ю.Н.,
д.ф.-м.н. Пустильник С.А.,
к.ф.-м.н. Семенова Т.А.,
к.ф.-м.н. Сотникова Ю.В.,
д.ф.-м.н. Тихонов Н.А.,
д.ф.-м.н. Трушкин С.А.,
д.ф.-м.н. Фабрика С.Н.,
д.ф.-м.н. Ченцов Е.Л.,
к.ф.-м.н. Черненко В.Н.,

Слушали: доклад П. Г. Цыбулёва о диссертации “Развитие систем регистрации радиоастрономических данных и повышение чувствительности радиотелескопа РАТАН-600”, представляемой на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия

Цыбулёв Петр Григорьевич, род. 25.09.1967, окончил Харьковский государственный университет им. А.М. Горького 27.06.1989 по специальности “физика”. Работает в Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН) в лаборатории радиометров континуума РАТАН-600 с 1989 года по настоящее время. В период подготовки диссертации работал в САО РАН в должности научный сотрудник, старший научный сотрудник.

Диссертация посвящена развитию средств и методов радиоастрономических наблюдений и радиометрических измерений, повышению чувствительности и долговременной стабильности радиометров континуума (непрерывного спектра излучения), устранению внешних и внутренних факторов, мешающих реализации расчетной чувствительности штатных радиометров и радиотелескопа РАТАН-600 в целом.

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 диапазоне 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.

Работы диссертанта над поставленными задачами были начаты в середине 90-х годов с развития систем сбора данных и управления (ССДиУ) радиометров континуума РАТАН-600 и внедрения средств и методов борьбы с внешними импульсными радиопомехами. Штатно работающая на тот момент система регистрации радиоастрономических данных детально описана в диссертационной работе В. Н. Черненко “Комплекс средств развития многоуровневой территориально-распределенной системы сбора и обработки данных радиотелескопа РАТАН-600”, (Специальная Астрофизическая Обсерватория РАН, 1996 г.). В результате этих работ были построены системы частотно-временного помехоподавления для радиометров дециметровых диапазонов (500 МГц – 2.4 ГГц), что позволило продлить наблюдения в этих диапазонах еще на 15 лет в условиях ухудшающейся помеховой обстановки.

Дальнейшие работы диссертанта направлены на устранения внутренних (от радиометра и системы регистрации) мешающих факторов, препятствующих достижению предельной чувствительности радиометров. Основным мешающим

фактором является наличие в радиометре “дрейфов нуля” измерительной аппаратуры, которые имеют спектральную плотность мощности вида $1/f$. Шум вида $1/f$ препятствует построению радиометра предельной чувствительности, а именно – радиометра полной мощности. Положительный опыт работ по частотно-временному помехоподавлению с применением современных средств цифровой обработки сигналов позволил диссертанту модернизировать системы регистрации радиоастрономических сигналов на новой аппаратно-программной основе. Одним из важнейших результатов этой разработки явилось то, что новые системы регистрации практически не вносят в измеряемый сигнал собственного шума вида $1/f$.

Практическое отсутствие в новой системе регистрации шума вида $1/f$ позволило диссертанту исследовать этот шум в самом радиометре, что привело к нахождению и устранению основного источника данного шума. Диссертанту удалось показать, что таким источником является детектор радиометра, построенный на основе диода с барьером Шоттки. Также показано, что применение детектора на основе обращенного туннельного диода резко снижает шум вида $1/f$ в неохлаждаемом радиометре, что позволяет на практике построить радиометр полной мощности, имеющий чувствительность вдвое выше, чем у обычно используемого модуляционного радиометра Р. Дике.

Новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые разработана и внедрена в практику радиоастрономических наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600 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.
2. Получены новые данные по шуму вида $1/f$ в радиометре и по источникам этого шума.
3. Устранен основной источник шума вида $1/f$ в радиометре.
4. Впервые на практике реализована чувствительность *идеального радиометра полной мощности* на типичных 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.

Личный вклад автора заключается в следующем. В работах по частотно-временному помехоподавлению автор разрабатывал и внедрял в радиоастрономические наблюдения алгоритмы и методы цифрового помехоподавления на основе быстродействующих цифровых сигнальных процессоров, а также методы постобработки полученных сигналов радиометров для получения чистого от помех сигнала радиометра. Автор также интегрировал новую аппаратуру цифровой обработки сигналов в существующую систему регистрации сигналов радиометров континуума РАТАН-600. Разработка и внедрение на всех радиометрах

континуума РАТАН-600 новой системы регистрации, не имеющей шума вида $1/f$, выполнена диссертантом самостоятельно. Исследование и устранение шума вида $1/f$ в самом радиометре также выполнено диссертантом самостоятельно. Личный вклад автора в астрофизических работах состоял в регистрации радиоастрономических данных и обсуждении полученных результатов.

Результаты, полученные автором, имеют научную и практическую ценность. Повышение точности измерений сигналов СВЧ-радиометров впервые позволило проводить радиоастрономические наблюдения с помощью *радиометра полной мощности* вместо стандартного подхода – *модуляционного радиометра (радиометра Дике)*. Чувствительность радиоастрономических наблюдений при этом автоматически возросла вдвое. Это означает увеличение вдвое точности измерения параметров источников радиоизлучения, и при неизменных остальных параметрах радиотелескопа примерно втрое увеличивает количество источников, доступных для наблюдения. Для слабых объектов, сигнал которых нужно накапливать, это приводит к уменьшению необходимого времени накопления в 4 раза. Конструкция радиометра резко упростилась. Известно, что *радиометр полной мощности* обладает самой простой из всех возможных конструкций. Ранее *радиометр полной мощности* не реализовывал расчетную чувствительность вследствие возникающего в нем шума вида $1/f$, и поэтому в СВЧ радиометрии обычно применялся модуляционный способ приема. В результате данной работы появилась возможность применять *радиометр полной мощности* как в радиоастрономических наблюдениях, так и в других задачах радиометрии, например - в задаче дистанционного пассивного картографирования поверхности Земли, а также – в медицинской радиометрии.

Достоверность полученных результатов обеспечена полным соответствием реальных характеристик радиометров расчетным и их подтверждением в реальных радиоастрономических наблюдениях. Системы Сбора Данных и Управления, построенные на разработанном новом оборудовании, уже более года работают в штатных наблюдениях на радиотелескопе РАТАН-600 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.

Важным свидетельством достоверности полученных результатов является их апробация на семинарах, российских и международных конференциях. Результаты представленной работы обсуждались на семинарах САО РАН, на конкурсе научно-технических работ САО РАН (2014 г., 1-е место), на Всероссийских Астрономических Конференциях 2001, 2004, 2007, 2010 и 2013 гг, на 3-х Всероссийских радиоастрономических конференциях 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.

Результаты работы Системы Сбора Данных и Управления на радиотелескопе РАТАН-600 и ее развития диссертантом успешно используются в течение 15 лет во многих астрофизических исследованиях с личным участием автора, и в сотнях других работ с применением ССДиУ радиометров континуума РАТАН-600 по таким направлениям, как исследования микроволнового фона Вселенной, галактических объектов, мгновенных широкодиапазонных спектров радиогалактик и квазаров, изучение радиоизлучения Солнца и планет Солнечной системы и многим другим.

Все выводы, выносимые на защиту, тщательно аргументированы и полностью изложены в статьях диссертанта, опубликованных в 14 работах в рецензируемых журналах из списка ВАК.

По докладу автора на семинаре САО РАН были заданы следующие вопросы. Пустильником С.А. — о патентах на разработки диссертанта и об использовании туннельных детекторов на других радиотелескопах. Фабрикой С.Н. — об остаточных эффектах при устранении шума $1/f$. Трушкиным С.А. — о том, относится ли представленное сравнение результатов к любым детекторам Шоттки, или только к тем, что ранее использовались на РАТАН-600. Афанасьевым В.Л. — о причине низкочастотных шумов, о термостабилизации радиометров и о наличии актов внедрения аппаратуры. Черненковым В.Н. — о динамическом диапазоне туннельных диодов.

Докладчик исчерпывающе ответил на все поставленные вопросы.

В выступлениях Афанасьев В. Л. отметил, что содержательная часть работы хорошо представлена, работа сильная, и также отметил, что в выводах, выносимых на защиту требуется больше формализма. Мингалиев М. Г. присоединился к мнению предыдущему выступающего, отметил, что результаты показаны очень ёмко. Руководитель диссертации Парийский Ю.Н. отметил, что диссертант работал чрезвычайно самостоятельно. Фабрика С.Н. назвал диссертацию важным событием для обсерватории, настолько кардинальные проблемы здесь решаются. Предложил рекомендовать диссертацию на докторскую степень, поскольку уровень решенных задач и полученные результаты этому вполне соответствуют. В последовавшей дискуссии это предложение было поддержано, Верховданов О.В. отметил реальность такого переоформления работы, Мингалиев М.Г. согласился, но посетовал, что процесс сложен и может занять много времени, Пустильник С.А. — поддержал это предложение. В заключение, Нижельский Н.А. отметил, что диссертант показал себя редким специалистом, совместившим в своей работе и знание математики, и программирование, и техническую работу с электроникой. Афанасьев В.Л. отметил, что это всего лишь 4-я диссертация по технаукам в истории САО РАН и второй случай, когда ее защищает относительно молодой человек, и это должно быть примером для наших инженеров.

Можно утверждать, что представляемая диссертация является самостоя-

тельной, завершенной научно-исследовательской работой, уровень которой значительно превышает формальные требования, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Члены астрофизического семинара САО РАН считают, что можно рекомендовать рассматриваемую диссертацию к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика и звездная астрономия.

Председатель астрофизического семинара
д.ф.-м.н. Моисеев А.В.

Подписи Моисеева А.В. заверяю,
ученый секретарь САО РАН Кайсина Е.И.

