

ФЕДОТОВ Леонид Васильевич

**Системы преобразования сигналов для радиоастрономических
интерферометров со сверхдлинными базами**

Специальность: 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Санкт-Петербург

2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институт прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН)

Официальные оппоненты:

Снегирев Сергей Донатович – доктор физико-математических наук, профессор, директор Научно-исследовательского радиофизического института Нижегородского Государственного Университета им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород.

Богод Владимир Михайлович – доктор физико-математических наук, заведующий Санкт-Петербургским филиалом Специальной Астрофизической Обсерватории Российской академии наук, г. Санкт-Петербург.

Алтынцев Александр Тимофеевич – доктор физико-математических наук, руководитель научного направления по радиоастрофизике Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук.

Защита состоится _____ в __ часов __ минут на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 на базе Института прикладной астрономии Российской академии наук по адресу: 191187, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии и на сайте ИПА РАН: www.ipa.nw.ru

Автореферат разослан _____ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук

Бондаренко Юрий Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) – важнейшее направление развития современной радиоастрономии. РСДБ широко применяется в научных исследованиях по многим направлениям астрофизики, астрометрии, геодинамики, космической навигации (Томпсон Р. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии / Томпсон Р., Моран Дж., Свенсон Дж.; пер. с англ. под ред. Л. И. Матвеевко. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 624 с.). РСДБ-технология, которая обеспечивает наилучшее угловое разрешение и максимальную точность измерения параметров вращения Земли (ПВЗ), является фундаментальной основой работы глобальных навигационных систем и решения многих прикладных задач координатно-временного обеспечения (Финкельштейн А. М. Фундаментальное координатно-временное обеспечение // Вестник Российской Академии наук. М.: Наука, 2007. Том 77, М 7. С. 608 – 617). Для повышения точности РСДБ-измерений радиотелескопы объединяются в национальные, региональные или международные РСДБ-сети, например: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS), European VLBI Network (EVN) или в нашей стране – «Квазар-КВО».

Система преобразования сигналов (СПС) – одна из основных систем радиотелескопа, обеспечивающая проведение РСДБ-наблюдений. Это целый многоканальный комплекс аппаратуры, который обычно подключается к выходам промежуточных частот (ПЧ) радиоастрономических приемных устройств и осуществляет: выделение сигналов в заданных участках диапазона рабочих частот, преобразование их по частоте с разделением верхней и нижней боковых полос, фильтрацию и аналого-цифровое преобразование сигналов, включая квантование их по амплитуде, формирование потока данных в требуемом формате и передачу его на регистрацию вместе с метками времени. От параметров СПС непосредственно зависит качество данных, получаемых при РСДБ-наблюдениях и, в конечном итоге, точность астрофизических и геодинамических измерений.

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Одной из основных проблем, которую надо было решать при создании РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» на рубеже 21 века, была проблема преобразования и первичной обработки информации на радиотелескопах, решение которой тормозилось из-за отсутствия отечественных СПС. Аппаратура для других систем радиотелескопа в том или ином виде существовала и была доступна. А вот с СПС ситуация была гораздо более сложной. Отечественной промышленностью СПС не производились. Вопросы их разработки не были до конца исследованы. Поэтому для оснащения первых радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» в обсерваториях «Светлое» и «Зеленчукская» приходилось закупать дорогие (стоимостью

около миллиона долларов США) импортные СПС, которые выпускались в единичных экземплярах и считались продукцией двойного назначения. Эти системы были разработаны и изготовлены в США в 80-е годы прошлого века и предназначались только для исследований по зарубежным программам. Задача ремонта и модернизации таких систем со временем все более усложнялась, а для оснащения других радиотелескопов в стране вообще не было СПС. Такое положение препятствовало вводу в эксплуатацию комплекса «Квазар-КВО» в целом и сдерживало развитие РСДБ-технологии в нашей стране. Эта проблема, имеющая важное хозяйственное значение, могла быть решена только на основе глубоких научных исследований и научно обоснованных новых технических решений. Проблема усложнялась тем, что к началу работы были известны лишь общая структура аналоговых СПС зарубежного производства, но практически отсутствовали материалы по методам расчета и проектирования таких систем. В публикациях приводились лишь краткие описания и некоторые параметры зарубежных образцов СПС без указания путей достижения параметров, требуемых для высокоточных РСДБ-измерений. Было неясно: с чего начать создание отечественной СПС и как ее проектировать. При этом первоочередной задачей была разработка СПС для радиотелескопа в обсерватории «Бадары», завершение строительства которого в 2005 году позволяло ввести в действие весь комплекс «Квазар-КВО».

Цель диссертационной работы – создание и использование новых систем преобразования сигналов для фундаментальных и прикладных исследований методами РСДБ.

Задачи исследования

Проблема создания первой отечественной многоканальной СПС для радиотелескопа РТ-32 в обсерватории «Бадары» требовала решения ряда научно-технических задач, в том числе:

- поиск путей достижения характеристик СПС, обеспечивающих высокую точность РСДБ-измерений,
- разработка способов сокращения аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра за счет улучшения развязки боковых полос в каналах СПС,
- разработка способов сопряжения СПС с аппаратурой регистрации, синхронизации записи формируемых в СПС данных и привязки их к шкале времени радиотелескопа,
- разработка методов контроля параметров СПС непосредственно на радиотелескопе.

В результате интенсивной эксплуатации зарубежных СПС на первых двух радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» встала задача замены этих СПС более совершенными системами. Этого требовало и повсеместное внедрение в международную практику РСДБ-наблюдений нового унифицированного формата записи данных VSI-H и соответствующей ему высокопроизводительной аппаратуры регистрации данных Mark 5B. Необходимо было не просто повысить надежность и ремонтпригодность СПС, улучшить ее параметры, но и

обеспечить дальнейшее повышение точности координатно-временных измерений для решения проблемы фундаментальной поддержки системы ГЛОНАСС, поставленной в Федеральной целевой программе «Глобальная навигационная система». Потребовалась разработка более совершенных СПС, использующих цифровые методы обработки сигналов. Для создания таких систем было необходимо:

- предложить принцип их построения, обеспечивающий с одной стороны возможность использования доступной элементной базы, а с другой стороны – улучшение параметров СПС при сокращении ее себестоимости,
- исследовать влияние ограничения спектра сигнала при его аналого-цифровом преобразовании на чувствительность радиоинтерферометра,
- исследовать параметры аналого-цифрового преобразования сигналов в цифровой СПС для их оптимизации с целью сокращения потерь чувствительности радиоинтерферометра и повышения точности измерений при РСДБ,
- разработать методы дистанционного контроля параметров СПС.

Пути решения этих специфических задач не нашли должного отражения как в литературе по РСДБ, так и в обширной литературе по вопросам цифровой обработки сигналов, и требовали специального исследования в процессе разработки цифровой СПС.

Развитие РСДБ-технологии по пути повышения точности и оперативности измерений ПВЗ, координат станций и источников излучения потребовало создания новых РСДБ-сетей на антеннах малого диаметра, которые позволяют существенно увеличить число наблюдений в течение сеанса. Для оперативного уточнения и мониторинга ПВЗ в интересах глобальной навигационной сети ГЛОНАСС также более рационально использовать радиотелескопы с небольшими антеннами, а не уникальные 32-метровые антенны комплекса «Квазар-КВО». Однако в этом случае СПС с преобразованием сигналов на видеочастотах, у которых полоса пропускания каналов обычно не превышает 16 – 32 МГц, практически непригодны, так как из-за уменьшения эффективной площади антенн чувствительность радиоинтерферометра падает. Для решения указанной проблемы была необходима разработка принципиально новых СПС с полосой пропускания каналов, расширенной до нескольких сотен МГц, способных обрабатывать многократно возросший поток информации. Именно в этом направлении развиваются зарубежные системы в рамках известных проектов VLBI2010 и VGOS. Принципы построения цифровых СПС с широкополосными каналами не были до конца ясны и практически не освещались в литературе. Для создания таких систем было необходимо:

- уточнить подход к выбору параметров СПС, обеспечивающих повышение чувствительности радиоинтерферометра при кардинальном расширении полосы частот канала

системы, а также некоторые вопросы, связанные с цифровым преобразованием широкополосных сигналов,

- разработать основные принципы построения СПС с цифровым преобразованием высокочастотных широкополосных сигналов, предложить научное обоснование новых технических решений, обеспечивающих работу такой системы.

Научная новизна работы

На основе данной диссертационной работы в стране впервые созданы СПС, которые не уступают, а по ряду параметров превосходят лучшие зарубежные системы. Впервые обоснованы принципы построения СПС, структура и параметры таких систем:

- На основе исследования методов улучшения параметров СПС, обеспечивающих сокращение аппаратных потерь чувствительности радиointерферометра, предложен принцип проектирования СПС на основе минимизации вносимых ею аппаратных потерь чувствительности.
- Предложен и реализован на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» принцип построения СПС с цифровым преобразованием сигналов на видеочастотах.
- Разработаны общие принципы построения СПС с цифровой обработкой широкополосных сигналов на промежуточных частотах, положенные в основу разработки цифровой СПС для оснащения радиотелескопов нового поколения РТ-13.

Впервые разработаны специальные методы контроля основных параметров СПС непосредственно на радиотелескопах, а также способы дистанционного тестирования цифровых СПС.

Предложенные новые технические решения позволили повысить качество получаемых данных РСДБ-наблюдений. Новизна решений подтверждена патентами Российской Федерации и результатами наблюдений РСДБ комплекса «Квазар-КВО» в течение ряда лет.

Практическая значимость работы

Ввод в эксплуатацию СПС Р1000 на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Бадары» позволил начать полномасштабные наблюдения на РСДБ-комплексе «Квазар-КВО» и за период с 2005 по 2011 год провести около 300 сеансов наблюдений как по отечественным, так и международным программам.

Разработанные цифровые СПС Р1002М внедрены на всех радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» и обеспечивают проведение регулярных РСДБ-наблюдений, что дало возможность достичь требуемой точности определения ПВЗ и стало одним из решающих факторов в решении проблемы координатно-временного обеспечения ГЛОНАС. В течение ряда лет данные РСДБ наблюдений, поступающие от радиотелескопов с СПС Р1002М, международными корреляционными центрами оцениваются высшим баллом.

Методологическая и теоретическая основа исследования

При решении поставленных задач использованы методы системного анализа, математического моделирования (аналитические и приближенные), физического моделирования (лабораторные исследования и исследования на реальных объектах), а также аппарат теоретической радиотехники, теории вероятностей и математической статистики.

Основные научные результаты, выносимые на защиту

1. Впервые в стране создана многоканальная система преобразования сигналов на основе видеоконверторов с квадратурным преобразованием частоты и фазовым разделением боковых полос сигнала, обеспечивающих снижение вносимых аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра до нескольких процентов. Это позволило начать полномасштабные наблюдения на РСДБ комплексе «Квазар-КВО» как по собственным программам, так и по зарубежным.
2. На принципах оптимизации параметров аналого-цифрового преобразования и использования цифровой обработки сигналов на видеочастотах до 32 МГц для снижения аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра созданы системы преобразования сигналов, которые существенно лучше зарубежных аналогов по уровню потерь и качеству получаемых данных. Это дало возможность на всех радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» перейти к регулярным РСДБ-наблюдениям.
3. Предложенные принципы использования субдискретизации и нового международного формата данных VDIF, а также размещения системы непосредственно на антенне с передачей выходных данных по волоконно-оптическим линиям через стандартный интерфейс и новые технические решения позволили впервые в стране создать систему преобразования с цифровой обработкой сигналов на промежуточных частотах до 1,5 ГГц и в радиоинтерферометре нового поколения компенсировать потери чувствительности из-за сокращения диаметров антенн.
4. Результаты РСДБ-наблюдений на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО», полученные с помощью разработанных систем преобразования сигналов.

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора

Материалы диссертации опубликованы в 51 научной статье, в том числе 11 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Кроме того, они отражены в тезисах и других материалах научных конференций. По теме диссертации получено 6 патентов Российской Федерации на полезные модели. Личный вклад автора в создание СПС и в совместных публикациях заключается в следующем:

- разработан научный подход к выбору основных параметров, научное обоснование принципов построения и проектирования СПС,

- разработаны структурные и функциональные схемы СПС, научно обоснованы пути их реализации,
- разработаны и исследованы способы сокращения аппаратных потерь чувствительности радиointерферометра за счет рационального проектирования СПС,
- предложен и реализован ряд новых технических решений, в частности по построению СПС с многокаскадными фазосдвигающими цепями и квадратурным делителем мощности в виде удвоителя частоты с последующим ее делением, синхронизации записи формируемых в СПС данных и привязки их к шкале времени радиотелескопа, демультимплексированию и инвертированию выборок сигнала в цифровой СПС, цифровому квантованию,
- разработаны методы контроля основных параметров СПС непосредственно на радиотелескопе,
- осуществлено научное руководство коллективом разработчиков СПС, а также планирование, методическая проработка и руководство исследованием разработанных систем.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты работы проверены на практике. Разработанные системы внедрены на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» и в течение ряда лет успешно используются для проведения РСДБ-наблюдений. Основные научные результаты докладывались и обсуждались на научных семинарах ИПА РАН, а также на следующих всероссийских и международных симпозиумах и научных конференциях:

1. Международная конференция «Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века» (Санкт-Петербург, 19 – 23 июня 2000 г.).
2. Всероссийская астрономическая конференция (Санкт-Петербург, 6 – 12 августа 2001 г.).
3. Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение» КВО-2005 (Санкт-Петербург, 11 – 15 апреля 2005 г.).
4. IVS 2004 General Meeting (Ottawa, Canada, 9 – 11 February 2004).
5. Всероссийская конференция «РСДБ-2012 для астрометрии, геодинамики и астрофизики» (Санкт-Петербург, 11 – 15 сентября 2006 г.).
6. 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting (Wien, 12 – 13 April 2007).
7. Радиоастрономическая конференция «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов» (п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесия, 22 – 27 сентября 2008 г.).
8. IVS 2010 General Meeting (Hobart, TAS, Australia, 7 – 14 February 2010).
9. Всероссийская радиоастрономическая конференция ВРК-2011 «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» (Санкт-Петербург, 17 – 21 октября 2011 г.).
10. Четвертая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-

временное и навигационное обеспечение» КВНО-2011 (Санкт-Петербург, 10 – 14 октября 2011г.).

11. IVS 2012 General Meeting (Madrid, Spain, 4 – 9 March 2012).

12. Пятая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» КВНО-2013 (Санкт-Петербург, 15 – 19 апреля 2013г.).

13. 21st Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy (Espoo, Finland, 5 – 8 March 2013).

14. Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, Навигация, Связь» RLNC 2014 (Воронеж, 15 – 17 апреля 2014 г.).

15. VII Международный симпозиум «Метрология времени и пространства». (Суздаль Владимирской обл., 17-19 сентября 2014 г.).

16. IVS 2014 General Meeting (Shanghai, China, 2 – 7 March 2014).

17. Шестая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» КВНО-2015 (Санкт-Петербург, 20 – 24 апреля 2015 г.).

18. 9th IVS General Meeting (Johannesburg, South Africa, 13 – 19 March 2016).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена исследованию путей создания аналоговой СПС для радиотелескопа РТ-32 в обсерватории «Бадары». В начале в ней представлен краткий обзор существующих систем. Затем сформулированы основные требования к СПС и показано, что при ее проектировании расчет ожидаемых параметров системы необходимо производить исходя из требуемой точности измерения групповой задержки сигнала и минимально допустимого уровня потерь чувствительности радиоинтерферометра, который непосредственно зависит от развязки боковых полос сигнала в видеоконверторе.

Развязка боковых полос или относительная величина ослабления помех по зеркальному каналу α_{SB} связана с коэффициентом потерь чувствительности ξ_{SB} , показывающим на сколько уменьшается отношение сигнал/шум на выходе коррелятора от данного фактора потерь, следующим выражением:

$$\xi_{SB} \approx \sqrt{\frac{\alpha_{SB1}\alpha_{SB2}}{\alpha_{SB1}\alpha_{SB2} + \alpha_{SB2} + \alpha_{SB1} + 1}}.$$

Здесь индексы 1 и 2 соответствуют первому и второму радиотелескопам, составляющим радиоинтерферометр.

За развязку боковых полос в СПС отвечает видеоконвертор, который выполняет все

основные функции системы по выделению и преобразованию сигналов промежуточных частот (ПЧ), поступающих с выхода приемной системы радиотелескопа. Функциональная схема видеоконвертора включает в себя преселектор с переключаемыми полосовыми фильтрами для подавления побочных каналов преобразования частот на гармониках частоты гетеродина, квадратурный преобразователь частот (КПЧ), в котором происходит перенос спектра сигналов с разделением верхней (ВБП) и нижней (НБП) боковых полос, а также два одинаковых тракта видеочастот с переключаемыми фильтрами, определяющими полосу пропускания канала СПС (Рисунок 1). Измерители среднеквадратического отклонения (СКО) напряжения сигнала

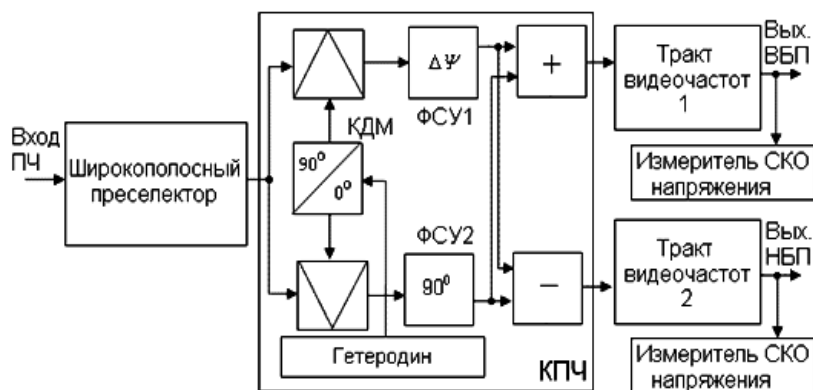


Рисунок 1 – Функциональная схема аналогового видеоконвертора: КДМ – квадратурный делитель мощности, ФСУ – фазосдвигающее устройство

необходимы для последующего амплитудного квантования и контроля мощности сигналов на выходах видеоконвертора.

Наиболее сложно при разработке видеоконвертора для аналоговой СПС обеспечить минимизацию α_{SV} в широком диапазоне рабочих частот (с десятикратным и более перекрытием по частоте) и в

широкой полосе пропускания каналов (не менее 16 МГц). Величина α_{SV} напрямую зависит от соотношения между коэффициентами передачи плеч КПЧ (разбаланса амплитуд η) и суммарной ошибки фазового сдвига между верхним и нижним плечами КПЧ (разбаланса фаз $\Delta\psi$). Например, чтобы сократить потери чувствительности от недостаточной развязки боковых полос до 1%, то есть обеспечить ослабление зеркального канала не менее чем на 20 дБ, необходимо чтобы разбаланс амплитуд не превышал 1,7 дБ, а разбаланс фаз был не более 10 градусов. Основное влияние на разбаланс амплитуд и разбаланс фаз оказывает способ построения квадратурного делителя мощности гетеродинного сигнала (КДМ) и фазосдвигающих устройств (ФСУ) в трактах видеочастот. Разбаланс амплитуд сравнительно легко свести к минимуму подстройкой коэффициентов передачи плеч КПЧ. Минимизация разбаланса фаз в широком диапазоне частот потребовала проведения специальных исследований способов реализации КДМ. Их сравнительный анализ показал, что решение задачи квадратурного деления мощности в диапазоне частот СПС (100 – 1000 МГц) обеспечивает только предложенный способ построения КДМ, основанный на умножении и делении частоты с автоматической подстройкой задержки сигнала [52]. Он дает минимальный

разбаланс амплитуд ($\eta_{\text{КДМ}} \leq 0,2$ дБ) и фаз ($\Delta \Psi_{\text{КДМ}} \leq 1,5$ градусов), что позволяет при условии абсолютно точного изготовления всех других фазосдвигающих устройств КПЧ добиться ослабления зеркального канала более 35 дБ и снизить потери чувствительности при разделении боковых полос до пренебрежимо малой величины 0,03%.

В свою очередь, фазосдвигающие устройства должны быть построены так, чтобы не только обеспечить в широкой полосе видеочастот постоянный фазовый сдвиг 90 градусов между сигналами в плечах КПЧ, но иметь линейные фазочастотные характеристики и практически одинаковые коэффициенты передачи. Условия эффективной работы ФСУ имеют вид:

$$\frac{\pi}{2} - \Delta \Psi_{\text{ФСУ доп.}} \leq \Psi_{\text{ФСУ}}(\Omega) \leq \frac{\pi}{2} + \Delta \Psi_{\text{ФСУ доп.}}, \quad -\eta_{\text{ФСУ доп.}} \leq 20 \lg \eta_{\text{ФСУ}}(\Omega) \leq \eta_{\text{ФСУ доп.}}$$

Здесь $\Psi_{\text{ФСУ}}(\Omega)$ – разность фазочастотных характеристик ФСУ1 и ФСУ2, $\Omega = 2\pi F$ – угловая частота, $\Delta \Psi_{\text{ФСУ доп.}}$ – допустимый разбаланс фаз, а $\eta_{\text{ФСУ доп.}}$ – допустимый разбаланс амплитуд в фазосдвигающих устройствах, выраженный в дБ. Исследования показали, что ФСУ целесообразно проектировать в виде каскадного соединения M простых унифицированных фазовых звеньев (ФЗ) низкого порядка, легко реализуемых на интегральных микросхемах операционных усилителей [16, 17]. В этом случае выражения для отношения модулей коэффициентов передачи и фазового сдвига между ФСУ1 и ФСУ2 имеют вид:

$$\eta_{\text{ФСУ}}(F) = \prod_{i=1}^M \left[\frac{1 + (F/F_{qi})^2}{1 + (F/F_{pi})^2} \right]^{1/2} \left[\frac{1 + K_{0pi}^2 (F/F_{pi})^2}{1 + K_{0qi}^2 (F/F_{qi})^2} \right]^{1/2}$$

$$\Psi_{\text{ФСУ}}(F) = \sum_{i=1}^M \arctg \left[\frac{(1 + K_{0qi}) F/F_{qi}}{1 - K_{0qi} (F/F_{qi})^2} \right] - \sum_{i=1}^M \arctg \left[\frac{(1 + K_{0pi}) F/F_{pi}}{1 - K_{0pi} (F/F_{pi})^2} \right],$$

где K_{0i} – коэффициент передачи i -го ФЗ по постоянному току, а F_i – частота его настройки,

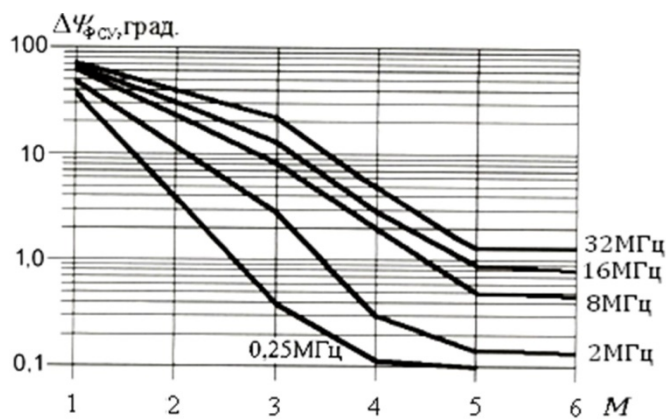


Рисунок 2 – Зависимость максимального разбаланса фаз от числа фазовых звеньев ФСУ при различной ширине полосы пропускания видеоконвертора

индексами p и q обозначены параметры, относящиеся к соответственно верхнему и нижнему плечам КПЧ (Рисунок 1).

Математическое моделирование процессов в ФСУ на основе указанных выражения показало, что для каждой полосы пропускания видеоконвертора существует оптимальное число фазовых звеньев M , соответствующее заданному допустимому разбалансу фаз $\Delta \Psi_{\text{ФСУ доп.}}$, а значит и допустимым потерям чувствительности радиointерферометра (Рисунок 2). Это

позволило разработать специальную методику проектирования ФСУ, обеспечивающую качественное разделение боковых полос и минимизацию потерь чувствительности радиоинтерферометра [17].

Другой важной проблемой, которую приходилось решать при создании аналоговой СПС, была минимизация ошибок синхронизации выходных данных СПС при их регистрации. За синхронизацию данных на радиотелескопе, прежде всего, отвечает специальная система частотно-временной синхронизации (СЧВС). Однако, средства синхронизации включают в себя также и элементы СПС (Рисунок 3), так как одна из основных функций этой системы – маркировка выборок сигнала при формировании потока данных в формате.



Рисунок 3 – Функциональная схема синхронизации данных при их регистрации на радиотелескопе

Способ такой маркировки зависит от принятого при регистрации формата данных. Для наиболее распространенного при РСДБ наблюдениях формата данных потоки квантованных выборок сигналов сопровождаются меандром тактовой частоты f_T и импульсами меток времени – так называемым сигналом 1PPS (one pulse per second). Маркировка выборок сигнала состоит в установке взаимно однозначного соответствия между регистрируемыми выборками и моментами времени $t_i = N_0 N_{PPS} T + n_i T$, где N_0 – число секунд после момента начала регистрации сигнала от данного конкретного источника радиоизлучения, N_{PPS} – число периодов T тактовой частоты f_T , укладывающихся на периоде следования меток времени 1PPS, n_i – номер выборки сигнала. Выражение для дисперсии ошибки маркировки выборок сигнала в СПС имеет вид: $\sigma_{\Delta t}^2 = (N_0 N_{nom} + n_i)^2 \sigma_{\Delta T}^2 + \sigma_{\Delta N}^2 N_0^2 (\sigma_{\Delta T}^2 + 1/f_T^2)$, где $N_{nom} \equiv f_T$ – номинальное число периодов T на периоде следования импульсов 1PPS, $\sigma_{\Delta T}$ – СКО периода тактовой частоты от

номинала $1/f_T$, $\sigma_{\Delta N}$ – СКО числа N_{PPS} от номинала N_{nom} . Первое слагаемое в указанном выражении характеризует ошибку из-за нестабильности тактовой частоты f_T , а второе – ошибку из-за нестабильности фронтов секундных импульсов, поступающих на СПС от первичного датчика времени (приемника GPS/ГЛОНАСС), которая на несколько порядков больше и приводит к недопустимым спонтанным сдвигам шкал времени при регистрации сигналов.

Для того, чтобы практически исключить эти сдвиги разработаны основные принципы синхронизации потоков данных на выходе СПС [50, 55]:

- в явном виде должна быть промаркирована (привязана к моменту появления метки времени) начальная выборка сигнала на каждом скане (интервале непрерывного наблюдения конкретного источника),
- метки времени 1PPS необходимо формировать путем деления тактовой частоты f_T непосредственно в СПС, причем процесс деления запускается первым после получения команды на синхронизацию секундным импульсом от первичного датчика времени,
- фронты импульсов 1PPS должны быть привязаны к фронтам меандра f_T .

Технические решения, реализующие эти принципы, позволили обеспечить синхронизацию потоков данных в отечественных СПС практически без ошибок [53].

Проведенные исследования позволили создать аналоговый видеоконвертор Р1200 [2, 13] и на его основе разработать первую отечественную многоканальную СПС Р1000 для обсерватории «Бадары». При этом были использованы методы проектирования, обеспечивающие минимизацию инструментальных потерь чувствительности радиоинтерферометра из-за искажений сигналов в каналах системы и реализованы принципы, обеспечивающие преимущества Р1000 перед зарубежными аналогами:

- максимально широкий диапазон рабочих частот (100 – 1000 МГц),
- полная совместимость с наиболее распространенными зарубежными СПС и всеми существовавшими в то время системами регистрации сигналов,
- блочно-модульный принцип построения системы,
- относительно низкая себестоимость за счет использования рациональных технических решений.

СПС Р1000 [1] включает в себя три типа блоков – модулей: основной блок (Р1103), несколько дополнительных блоков (Р1101) и блок (Р4103) сопряжения с регистрирующей аппаратурой (Рисунок 4). Основной блок содержит распределитель входных широкополосных сигналов ПЧ и два видеоконвертора Р1200. Каждый дополнительный блок содержит по три таких же видеоконвертора. Блок сопряжения состоит из 16-канального 2-битового квантователя

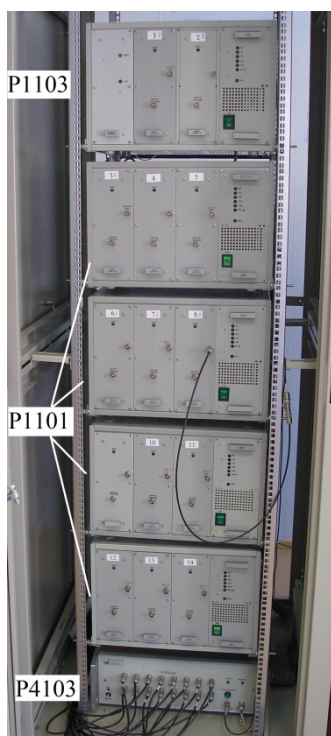


Рисунок 4 – 14-канальная
СПС Р1000 в
обсерватории «Бадары»

сигналов, узла синхронизации записи сигналов и согласующего устройства для сопряжения с форматом данных, принятым в регистрирующей аппаратуре.

В минимальной 2-канальной конфигурации система Р1000 может состоять только из двух блоков: Р1103 и Р4103. При необходимости число каналов можно варьировать от 2 до 14 путем подключения от одного до четырех дополнительных блоков Р1101. Два широкополосных входа системы, расположенных непосредственно на распределителе широкополосных сигналов ПЧ дают возможность одновременно обрабатывать сигналы, принятые радиотелескопом в двух диапазонах длин волн, либо в двух различных поляризациях.

Параметры СПС Р1000 не уступают параметрам лучших образцов зарубежных аналоговых систем преобразования сигналов для РСДБ. Она обеспечивает работу с полосой пропускания каждого из 14 каналов 2, 4, 8 или 16 МГц и суммарную скорость информационного потока на входе 1 Гбит/с. А по диапазону рабочих частот (100 – 1000 МГц), ослаблению шумов зеркального канала (26 дБ) и уровню шумов гетеродинов (менее 1.2 градуса фазы) Р1000 превосходит зарубежные аналоги.

Во **второй главе** исследуются способы улучшения параметров СПС путем цифровой обработки сигналов и вопросы создания цифровых систем для всех радиотелескопов РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». В начале главы исследовано влияние наложения спектров сигналов при аналого-цифровом преобразовании на потери чувствительности радиоинтерферометра. Наложение спектров ведет к появлению дополнительного шума в канале СПС и обусловленные этим фактором потери можно учесть аналогично потерям от шумов зеркального канала. Коэффициент сокращения отношения сигнал/шум на выходе радиоинтерферометра за счет наложения спектров при аналого-цифровом преобразовании сигнала определяется выражением

$$\xi_{al} = \sqrt{\frac{P_{N1}P_{N2}}{(P_{N1} + P_{A1})(P_{N2} + P_{A2})}},$$

где P_{N1} и P_{N2} – мощности шумов в каналах СПС, P_{A1} и P_{A2} – дополнительные мощности шумов, попадающие в каналы из-за наложения спектров, индексы 1 и 2 относятся к 1-му и 2-му радиотелескопам интерферометра. Для ограничения спектра сигнала при аналого-цифровом преобразовании он пропускается через фильтр с частотой среза F_{cp} . Очевидно, что при одной и той же крутизне скатов амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра чем меньше F_{cp} , тем меньше потери из-за наложения спектров. Однако при этом возрастают потери, вызванные

сокращением эффективной полосы частот сигнала из-за того, что форма АЧХ неидеальная. Суммарные потери от наложения спектров и неидеальности АЧХ фильтра характеризует коэффициент ξ_Σ . Анализ зависимости этого коэффициента от параметров фильтра (Рисунок 5)

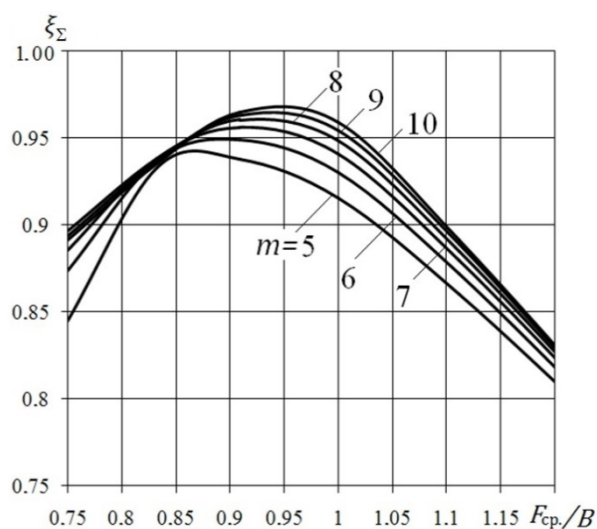


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента потерь чувствительности радиоинтерферометра от соотношения между частотой среза ограничивающего спектр сигнала фильтра F_{cp} и полосой пропускания СПС B для фильтров Баттерворта различного порядка m

показал, что при соотношении между F_{cp} и заданной полосой пропускания СПС (B) менее 0,9 влияние наложения спектров на потери чувствительности незначительно и с увеличением частоты среза потери чувствительности сокращаются (коэффициент ξ_Σ растет), так как увеличивается полоса частот сигнала, преобразуемого в цифровой поток. Однако, по мере того, как отношение F_{cp}/B приближается к 1, все более сказываются потери от наложения спектров и ξ_Σ начинает падать (потери возрастают). Таким образом, существует оптимальное соотношение частот F_{cp} и B , которое тем ближе к 1, чем выше порядок фильтра, то есть крутизна скатов его АЧХ. Этот факт дает возможность при проектировании

цифровой СПС выбрать оптимальные характеристики фильтра, которые обеспечивают минимизацию аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра.

Важной задачей при проектировании цифровой СПС является выбор параметров аналого-цифрового преобразования, а именно числа двоичных разрядов либо числа уровней квантования N_u , а также соотношения $\mu = U_{доп.}/\sigma_u$ между допустимым входным напряжением аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и номинальным уровнем (среднеквадратическим значением) входного шумового сигнала σ_u . Этот выбор должен обеспечить с одной стороны независимость выборок шумового сигнала на выходе АЦП, а с другой стороны – минимизацию потерь от аналого-цифрового преобразования. Для шумового сигнала с постоянной спектральной плотностью мощности, которая ограничена по частоте полосой B , дискретизация в соответствии с теоремой отсчетов ($f_T \geq 2B$) – обязательное условие получения на выходе АЦП независимых оцифрованных выборок сигнала (Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.). Однако, это условие не единственное. При равномерном квантовании выборок случайной функции число уровней квантования должно удовлетворять условию:

$$N_u > \mu \sqrt{\frac{2(1+q^2)}{q^2[1-r_c(T)] + 1 - r_{ш}(T)}},$$

где q^2 – отношение сигнал/шум по мощности на входе АЦП, $r_c(T)$ и $r_{ш}(T)$ – нормированные корреляционные функции соответственно сигнала и шума, а T – период тактовой частоты f_T . Если в первом приближении считать, что как сигнал, так и шум на входе АЦП имеют постоянную спектральную плотность мощности в полосе частот $1/(2T)$, а за ее пределами спектральная плотность равна нулю, то указанное условие упрощается: $N_u > \mu\sqrt{2}$. Таким образом, если среднеквадратическое значение напряжения на входе АЦП равно, например, $\sigma_u = U_{\text{доп.}}/2$ (то есть $\mu = 2$), то уже при $N_u = 3$ выборки будут независимыми. Однако, такой большой уровень сигнала на входе АЦП ведет к амплитудным ограничениям и соответствующим искажениям параметров шумового сигнала. Полученная путем математического моделирования зависимость систематической ошибки вычисления дисперсии оцифрованного шумового сигнала $\delta_\sigma = 1 - \sigma_{\text{вых.АЦП}}^2 / \sigma_u^2$ от параметра μ показывает, что указанная ошибка при большом уровне сигнала (когда μ мало) может достигать существенной величины и становится пренебрежимо малой, только если $\mu > 3$ (Рисунок 6).

Количество информации о сигнале в каждой выборке после АЦП в свою очередь тоже зависит от параметров μ , N_u и δ_σ :

$$I = \frac{1}{2} \log_2 \left[1 + \frac{q^2}{1 + \mu^2(1 + q^2)/3N_u^2(1 - \delta_\sigma)} \right].$$

Поэтому относительные потери информации при аналого-цифровом преобразовании шумового сигнала в СПС, которые можно определить как $(1 - I/I_0)$, где $I_0 = \frac{1}{2} \log_2(1 + q^2)$ (Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966.– 679 с.), зависят от числа $b = \log_2 N_u$ разрядов АЦП. Причем если $b > 6$, то потерь информации практически нет (Рисунок 7).

Проведенные исследования дали возможность разработать видеоконвертор с цифровой обработкой сигналов на видеочастотах [17, 79] и цифровую СПС Р1002М [5], в которой реализованы принципы, обеспечившие ее преимущества по сравнению со всеми, существовавшими на тот момент, зарубежными системами:

- идентичность характеристик каналов;
- полная совместимость с существующими системами, в том числе аналоговыми;
- возможность изменения характеристик каналов и модернизации системы без изменения аппаратной части;
- блочно-модульный принцип построения для гибкого комплексования аппаратуры на радиотелескопе в зависимости от круга решаемых задач и возможностей экспериментатора;

- низкая себестоимость (примерно на 40% ниже, чем у аналогичных зарубежных систем) при высокой надежности работы, простоте настройки и эксплуатации СПС.

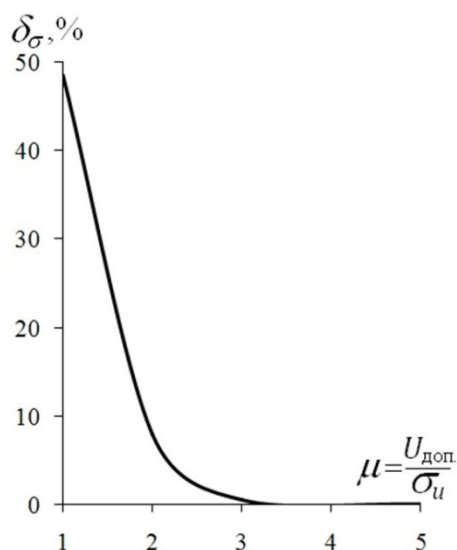


Рисунок 7 – Зависимость потерь информации от числа разрядов АЦП при различном уровне сигнала на входе для конкретного отношения сигнал/шум $q=0,01$

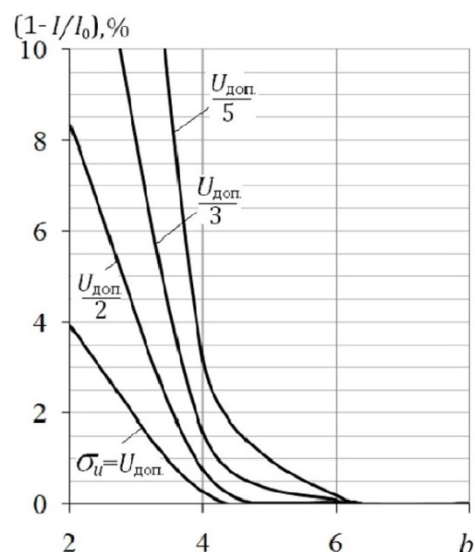


Рисунок 6 – Зависимость систематической ошибки определения дисперсии сигнала от соотношения между допустимым напряжением и номинальным уровнем сигнала на входе АЦП

СПС Р1002М (Рисунок 8) включает в себя три блока: основной блок Р1104 и два

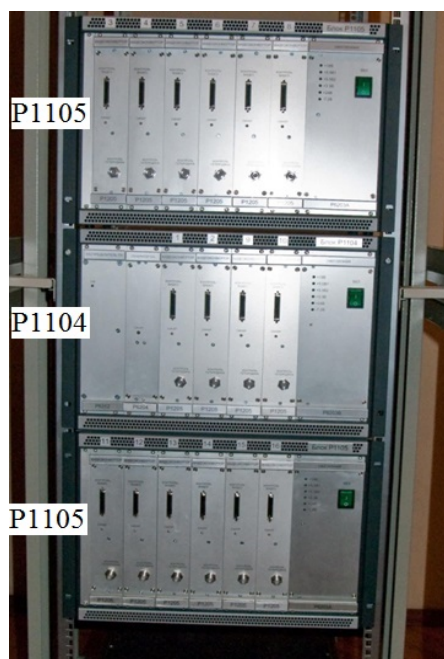


Рисунок 8 – Промышленный образец СПС Р1002М в обсерватории «Зеленчукская»

дополнительных блока Р1105. В основном блоке размещены входной распределитель сигналов ПЧ, генератор опорных частот, и четыре цифровых видеоконвертора Р1205М. В каждом дополнительном блоке установлено шесть видеоконверторов. Основной блок Р1104 может работать автономно как 4-канальная СПС. Дополнительные блоки дают возможность наращивать число каналов СПС до 10 (при одном блоке Р1105) или до 16 (при двух блоках Р1105). Система имеет 4 одинаковых широкополосных входа для сигналов ПЧ, что позволяет одновременно наблюдать сигналы двух поляризаций в двух диапазонах длин волн. Цифровые потоки с выходов каналов дополнительных блоков по высокоскоростному интерфейсу передаются в основной блок, где они объединяются, синхронизируются и форматируются. Суммарный информационный поток в формате VSI-H со скоростью до 2 Гбит/с поступает на выход системы.

Основные параметры СПС Р1002М существенно превосходят параметры существующих аналоговых систем: ослабление шумов зеркального канала не менее 42 дБ; число

переключаемых полос пропускания – 8; нелинейность фазочастотных характеристик каналов системы практически отсутствует. Это позволило свести потери чувствительности радиоинтерферометра, вносимые этой системой, практически к нулю. Такими системами оснащены все радиотелескопы РТ-32 комплекса «Квазар-КВО».

Третья глава посвящена разработке методов и встроенных средств контроля основных параметров СПС непосредственно на радиотелескопе. Обычные радиотехнические методы проверки характеристик и контроля параметров узлов и модулей СПС не позволяют судить о работоспособности системы в целом и не всегда могут быть использованы на радиотелескопе, так как на выходах СПС присутствуют только цифровые потоки данных.

Разработанная методика проверки основных параметров СПС Р1000 на основе контроля спектральных характеристик гетеродинов системы на конкретных рабочих частотах, проверки работы каналов по синусоидальному сигналу, измерения величины ослабления зеркального канала, контроля АЧХ каналов системы по шумовому сигналу и контроля статистики распределения квантованных сигналов на выходе СПС обеспечивает проверку работоспособности СПС непосредственно на радиотелескопе с применением только штатного оборудования.

Для дистанционного тестирования цифровой СПС Р1002М на радиотелескопе в ее программном обеспечении предусмотрено [37]:

- измерение уровней мощности широкополосных сигналов ПЧ на всех входах СПС;
- отображение частот настройки всех каналов системы, а также наличия или отсутствия синхронизации гетеродинов видеоконверторов;
- измерение СКО напряжения сигнала в полосе пропускания каждого канала на выходах верхней и нижней боковых полос;
- измерение величины ослабления помех по зеркальному каналу;
- контроль статистики распределения квантованных сигналов по уровням квантования на выходе СПС;
- отображение корреляционных функций и нормированных спектров мощности сигналов в каналах;
- отображение АЧХ каналов;
- контроль наличия и синхронизации сигнала 1PPS на выходе системы.

Предложенный способ дистанционного измерения величины ослабления зеркального канала в СПС по синусоидальному сигналу с использованием встроенного измерителя среднеквадратического значения сигнала дает возможность оценить работоспособность СПС непосредственно на радиотелескопе без применения дополнительного оборудования [50].

При РСДБ-наблюдениях на вход приемной системы радиотелескопа обычно вводится сигнал фазовой калибровки (СФК) в виде последовательности импульсов пикосекундной длительности. Он затем используется при корреляционной обработке зарегистрированных на радиотелескопе сигналов. С помощью методов математического моделирования в 3-й главе обоснован алгоритм выделения и анализа СФК в цифровой СПС, который включает в себя:

- формирование пакета из N цифровых выборок сигнала на интервале времени, равном периоду следования импульсов СФК,
- усреднение M таких пакетов каждую секунду и формирование N отсчетов выделенного из смеси с шумовым сигналом СФК,
- дискретное преобразование Фурье полученных N отсчетов СФК,
- отображение аргумента полученной спектральной функции в виде фазочастотной характеристики.

Разработанный способ дистанционного контроля фазочастотных характеристик сигнального тракта радиотелескопа с помощью выделения в СПС и цифровой обработки СФК обеспечивает не только подготовку к проведению сеансов РСДБ-наблюдений без использования измерительных приборов, но и контроль когерентности сигналов непосредственно в процессе РСДБ-наблюдений.

Четвертая глава посвящена изложению результатов применения СПС P1000 и P1002M при РСДБ-наблюдениях на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО». Ввод в эксплуатацию в 2006 году на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Бадары» промышленного образца СПС P1000 позволил не только установить там сопрягаемый с указанной СПС регистрирующий терминал последнего поколения Mark 5B фирмы Conduant (США), работающий в новом для того времени формате VSI-H, но и ввести этот радиотелескоп в состав сети «Квазар-КВО» и международных сетей РСДБ. Это дало возможность обсерватории «Бадары» 1–2 марта 2007 г. принять участие в международном РСДБ-сеансе наблюдений по программе IVS R4265, который стал одним из первых в мире опытов применения формата VSI-H в геодезических РСДБ наблюдениях. Полученные с помощью P1000 данные наблюдений источников были оценены наивысшим баллом.

С вводом в эксплуатацию СПС P1000 впервые начались полномасштабные РСДБ-наблюдения на трехэлементном радиоинтерферометре комплекса «Квазар-КВО» по отечественным наблюдательным программам Ru-U (определение поправок Всемирного времени) и Ru-E (уточнение параметров вращения Земли). Причем число наблюдательных сеансов из года в год возрастало и в целом за 4 года эксплуатации P1000 достигло почти 300. Внедрение СПС P1000 и аппаратуры регистрации Mark5B дало возможность с 2009 года в среднем в 1,4 раза увеличить число наблюдений космических источников радиоизлучения в

течение суток. Это стало одним из решающих факторов, позволивших достичь на РСДБ комплексе «Квазар-КВО» к концу 2011 года точности определения поправок Всемирного времени не хуже 70 мкс, а координат полюса – не хуже 0,001 угловой секунды (Рисунок 9).

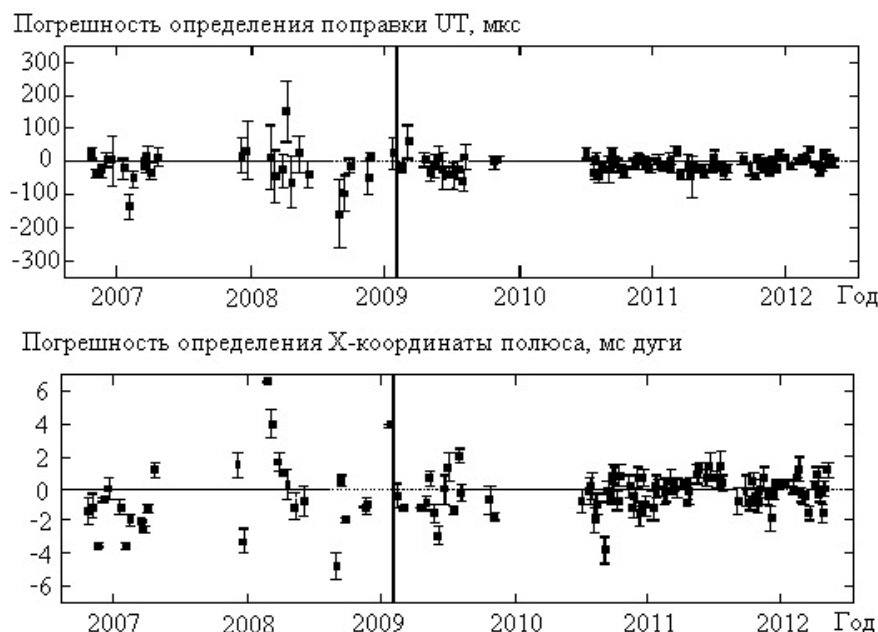


Рисунок 9 – Погрешности определения с помощью комплекса «Квазар-КВО» поправок Всемирного времени и координат полюса (СКО разностей с рядом IERS 08 C04 после удаления тренда) по результатам наблюдений с 2007 по 2012 год

Высокое качество получаемых с помощью P1000 данных обеспечило подключение обсерватории «Бадары» с 2010 года к программам астрофизических наблюдений европейской РСДБ-сети EVN. За два года было проведено более 20 международных сеансов РСДБ-наблюдений EVN с участием системы P1000.

При вводе в эксплуатацию на всех радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» цифровых СПС P1002M в 2011 г. были проведены исследования эффективности использования этой системы по сравнению с применявшимися ранее аналоговыми СПС, которые показали увеличение отношения сигнал/шум корреляционных откликов при использовании систем P1002M в среднем в 1,2 – 1,3 раза и сокращение почти в 20 раз разброса амплитуд откликов для разных каналов системы. В результате среднеквадратическая погрешность определения групповой задержки сигнала при использовании P1002M уменьшается на 20 – 25 %, что особенно важно при наблюдениях слабых источников.

Ввод в эксплуатацию СПС P1002M дал возможность перейти на комплексе «Квазар-КВО» к регулярным РСДБ-наблюдениям по отечественным и международным программам и провести за период 2011 – 2015 годов более 1700 сеансов наблюдений, увеличив при этом в среднем на 20% число наблюдений за одну сессию, пригодных для вторичной обработки (Рисунок 10).

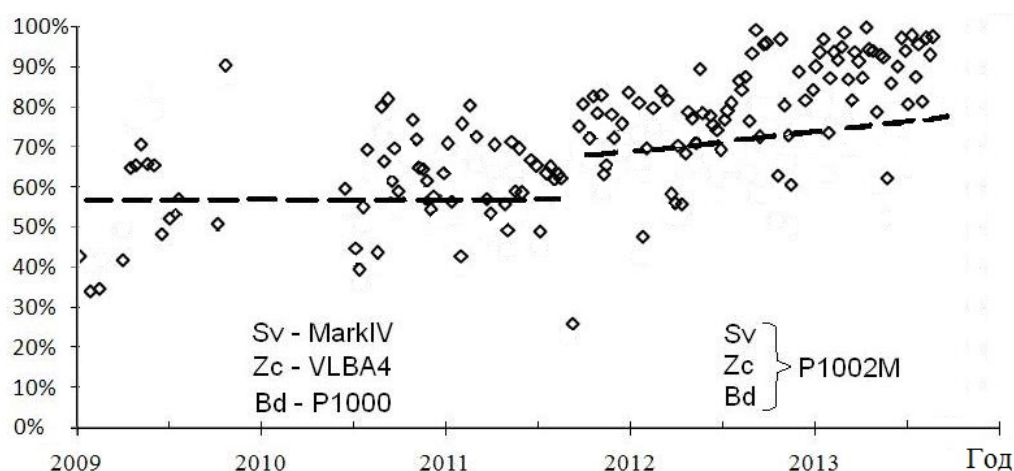


Рисунок 10 – Среднее число наблюдений на РСДБ-комплексе «Квазар-КВО», пригодных для вторичной обработки в процентах от общего числа наблюдений за сессию

Высокая надежность работы систем P1002M стала одним из факторов, позволивших перейти с июля 2012 года от еженедельных к ежедневным наблюдениям на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» и достичь к концу года для точности определения поправок Всемирного времени значений 63 мкс по оперативным часовым сессиям и 37 мкс по суточным сессиям (Рисунок 11).

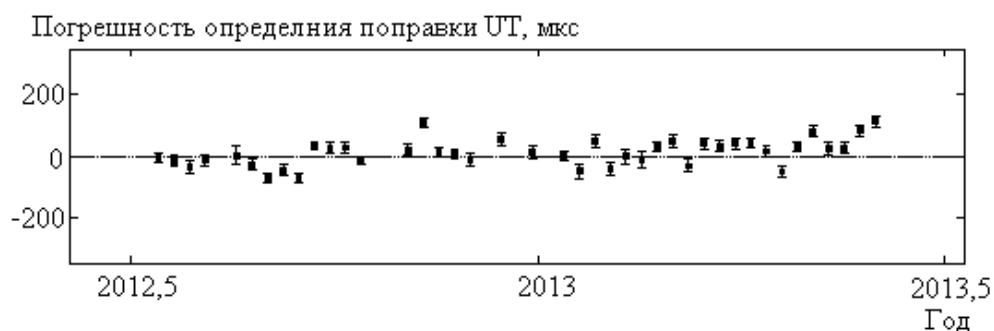


Рисунок 11 – Погрешности определения с помощью комплекса «Квазар-КВО» поправок Всемирного времени (СКО разностей с рядом IERS 08 C08 после удаления тренда) по результатам наблюдений с июня 2012 по июнь 2013 года

Это полностью удовлетворяло требования по точности координатно-временных измерений, необходимых для фундаментальной поддержки системы ГЛОНАСС и закрепленных в соответствующей Федеральной целевой программе. После оснащения системами P1002M все три радиотелескопа комплекса «Квазар-КВО» регулярно участвуют в наблюдениях по международным астрофизическим программам EVN, причем весовой коэффициент качества РСДБ-данных, получаемых от P1002M после первичной обработки, как правило, равен 1 в течение всего времени наблюдений. Это является одним из факторов, позволяющих проводить высококачественное картографирование исследуемых источников космического радиоизлучения и отслеживать их динамику. Наряду с другими мероприятиями по улучшению работы комплекса «Квазар-КВО» оснащение всех радиотелескопов системами P1002M дало

возможность начать проводить на этом комплексе собственные астрофизические наблюдения по отечественным программам.

В пятой главе исследуются вопросы построения широкополосной цифровой СПС для перспективных РСДБ-комплексов. Дан краткий обзор зарубежных исследований по созданию таких систем, обоснована необходимость расширения полосы пропускания каналов СПС до 512 МГц для компенсации потерь чувствительности радиоинтерферометра нового поколения на антеннах малого диаметра РТ-13. Основные принципы, на которых базируется широкополосная цифровая СПС (ШСПС) заключаются в следующем:

1. В системе должны в максимальной степени использоваться цифровые методы обработки сигналов для обеспечения ее надежности, стабильности работы, повторяемости характеристик, простоты настройки и возможности модернизации системы без изменения аппаратной части.

2. Использование субдискретизации при аналого-цифровом преобразовании сигналов в ШСПС, когда тактовая частота дискретизации определяется не верхней границей полосы частот, занимаемой спектром сигнала, а только шириной этой полосы частот, позволяет исключить избыточность и упростить реализацию цифровых преобразований.

3. Использование нового международного формата данных VDIF дает возможность обеспечить совместимость с зарубежной аппаратурой при проведении сеансов международных РСДБ-наблюдений.

4. Размещение системы непосредственно на антенне радиотелескопа и передача выходных цифровых потоков по оптическим линиям через стандартный интерфейс обеспечивает надежность передачи и помехозащищенность данных, а также позволяет избавиться от искажающих широкополосный сигнал коаксиальных кабельных линий между антенной и аппаратным помещением радиотелескопа.

5. Модульный принцип построения и наличие нескольких равноценных входов дает возможность легко сопрягать ШСПС с различными радиоастрономическими приемными устройствами, варьировать число каналов-модулей в зависимости от используемого диапазона длин волн и решаемых на радиотелескопе задач, одновременно принимать сигналы двух поляризаций в нескольких диапазонах длин волн.

Для оптимизации проектирования ШСПС установлено, что при использовании субдискретизации получаемая совокупность отсчетов сигнала не зависит от того, в какой зоне Найквиста располагается ограниченный по частоте спектр входного шумового сигнала, что открывает возможность сопряжения с СПС с радиоастрономическими приемными устройствами, использующими любой способ преобразования частоты сигнала. Предложен алгоритм функционирования автоматической регулировки усиления в цифровой СПС,

основанный на поддержании оптимального соотношения между среднеквадратическим значением напряжения шумового сигнала и максимально допустимым напряжением на входе АЦП [50]. Обоснована структура ШСПС в виде 8-ми одинаковых модулей – каналов цифрового преобразования сигналов (КЦП), модуля синхронизации и узла питания, соединенных между собой через кросс-плату [6, 8]. Это легло в основу создания широкополосной СПС для радиотелескопов РТ-13 (Рисунок 12), обеспечивающей преобразование сигналов одновременно в 8 каналах с шириной полосы частот каждого 512 МГц и суммарной скоростью информационного потока на выходе системы 16 Гбит/с.

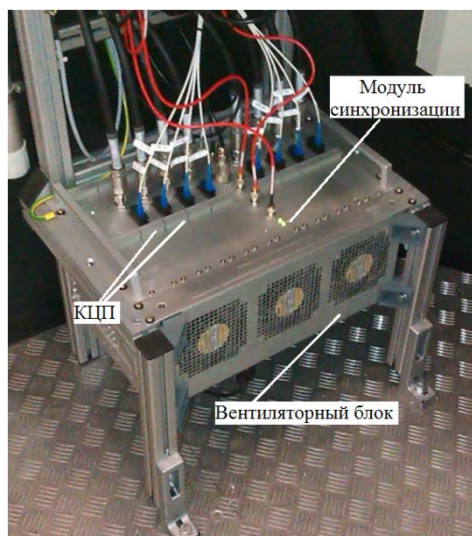


Рисунок 12 – ШСПС на антенне радиотелескопа РТ-13 в обсерватории «Бадары»

Эффективность использования ШСПС была исследована на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». Для этого в 2012 – 2013 году было проведено несколько экспериментальных сеансов РСДБ-наблюдений, когда одновременно с исследуемым широкополосным каналом прототипа ШСПС работали 8 видеоконверторов (каналов) штатной системы Р1002М. Эти исследования показали, что использование ШСПС на радиотелескопах РТ-32 позволяет даже для источников со спектральной плотностью мощности излучения менее 0,1 Ян получать корреляционный отклик с отношением сигнал/шум около 100. Чувствительность и точность определения групповой задержки сигнала для радиоинтерферометра даже с одним каналом шириной 400 МГц на каждом радиотелескопе

близки по значению к соответствующим параметрам 8-канального радиоинтерферометра с каналами шириной 16 МГц и синтезом полосы частот шириной 736 МГц.

В 2015 году в процессе ввода в эксплуатацию радиотелескопов РТ-13 разработанная система обеспечила проведение более 200 тестовых сеансов РСДБ-наблюдений, которые показали высокое качество получаемых от ШСПС данных, практически идентичные характеристики каналов, устойчивую и надежную работу системы. Это дало возможность начать регулярные РСДБ-наблюдения на двухэлементном радиоинтерферометре с малыми антеннами РТ-13 (Рисунок 13) и обеспечить получение поправок Всемирного времени, необходимых для работы ГЛОНАСС, со среднеквадратической погрешностью не более 30 мкс.

В **заключении** сформулированы результаты диссертационной работы и основные итоги выполненного исследования. В диссертации решена проблема преобразования и первичной обработки на радиотелескопах радиоинтерферометрической информации, связанная с отсутствием систем для этих целей.

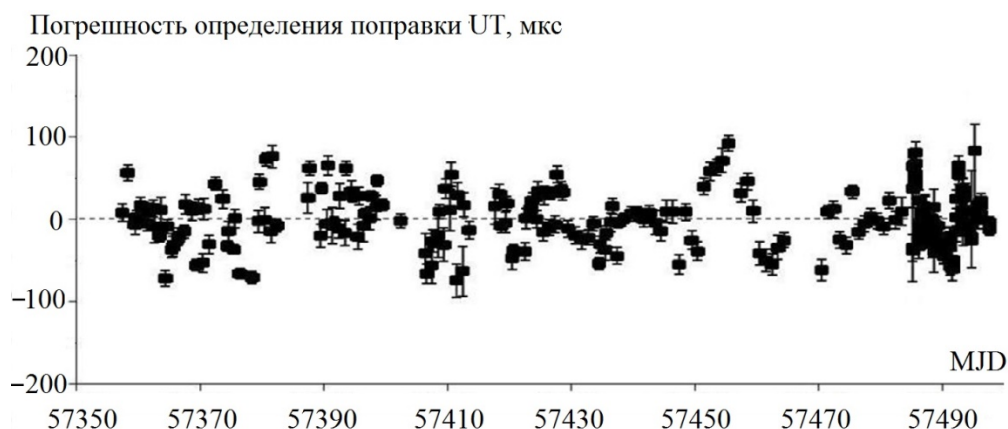


Рисунок 13 – Погрешности определения поправок Всемирного времени (СКО разностей с рядом IERS 08 C08 после удаления тренда) по результатам РСДБ-наблюдений на радиотелескопах РТ-13 с помощью ШСПС с декабря 2015 по май 2016 года; MJD – модифицированная юлианская дата.

Впервые в стране созданы системы преобразования сигналов, не уступающие, а по некоторым показателям превосходящие лучшие зарубежные аналоги. Создание отечественных СПС, совместно с решением других научных и хозяйственных проблем, обеспечило успешный ввод в эксплуатацию РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» и развитие в России РСДБ-технологии, как основы для проведения астрофизических и других научных исследований, а также для фундаментального координатно-временного обеспечения страны.

Проведенные при создании первой отечественной СПС Р1000 исследования показали, что расчет ожидаемых параметров системы необходимо производить исходя из требуемой точности измерения групповой задержки сигнала и минимально допустимого уровня потерь чувствительности радиоинтерферометра, который непосредственно зависит от развязки боковых полос сигнала в видеоконверторе. Доказано, что видеоконвертор СПС, построенный на принципах умножения с последующим делением частоты в квадратурном делителе мощности и последовательном соединении фазовых звеньев низкого порядка при разделении боковых полос сигнала в диапазоне частот 100 – 1000 МГц фазовым методом обеспечивает минимизацию вносимых им потерь чувствительности радиоинтерферометра. Методом математического моделирования установлено, что для каждого значения ширины полосы пропускания видеоконвертора СПС существует оптимальное число фазовых звеньев, обеспечивающее минимизацию аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра. Доказано, что синхронизация сигналов при сопряжении СПС с аппаратурой регистрации, основанная на принципах формирования меток времени путем деления тактовой частоты, привязанной к опорной частоте водородного стандарта, и совмещения фронтов меток времени с фронтами меандра тактовой частоты позволяет практически исключить ошибки синхронизации, влияющие на точность РСДБ-измерений.

Для повышения точности координатно-временных измерений и решения проблемы фундаментальной поддержки системы ГЛОНАСС, поставленной в Федеральной целевой программе «Глобальная навигационная система», предложена концепция создания СПС на основе цифровой обработки сигналов на видеочастотах, воплощенная в цифровых системах Р1002М, которыми в настоящее время оснащены все радиотелескопы РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». При разработке этих систем доказано, что существует оптимальное для минимизации аппаратных потерь чувствительности радиоинтерферометра соотношение между частотой среза фильтра, ограничивающего спектр сигнала при аналого-цифровом преобразовании, и заданной шириной полосы пропускания СПС. Это соотношение тем ближе к 1, чем выше порядок фильтра. Установлено, что систематическую ошибку вычисления дисперсии шумового сигнала, которая необходима для его последующего квантования по амплитуде, можно свести практически к нулю, если при проектировании цифровой СПС выбирать соотношение между максимально допустимым входным напряжением АЦП и номинальный уровень входного сигнала не менее 3. При этом если число разрядов АЦП выбрано не менее 6, то потери информации о сигнале при аналого-цифровом преобразовании можно практически исключить. Разработана структура СПС Р1002М на принципах идентичности характеристик каналов за счет использования цифровой обработки сигналов; полной совместимости с существующими системами, в том числе аналоговыми; возможности изменения характеристик каналов и модернизации системы без изменения аппаратной части; блочно-модульного построения и относительно низкой себестоимости при высокой надежности работы, простоте настройки и эксплуатации системы.

Чтобы обеспечить ввод в действие и эксплуатацию указанных систем разработана методика проверки основных параметров СПС Р1000 на основе контроля спектральных характеристик гетеродинов на конкретных рабочих частотах, проверки работы каналов по синусоидальному сигналу, измерения величины ослабления зеркального канала, контроля АЧХ по шумовому сигналу, а также контроля статистики распределения квантованных сигналов непосредственно на радиотелескопе с применением только штатного оборудования. Разработанная методика тестирования СПС Р1002М на основе дистанционного контроля основных параметров системы, а также способы дистанционного измерения величины ослабления зеркального канала по синусоидальному сигналу и контроля фазочастотных характеристик с помощью выделения в СПС и цифровой обработки сигнала фазовой калибровки обеспечивает подготовку системы к РСДБ-наблюдениям без использования измерительных приборов.

Ввод в эксплуатацию СПС Р1000 на радиотелескопе РТ-32 в обсерватории «Бадары» позволил обеспечить за 4 года проведение почти 300 сеансов наблюдений по отечественным и международным научным программам при максимально высоком качестве получаемых с

помощью P1000 данных. Это дало возможность достичь на РСДБ комплексе «Квазар-КВО» к концу 2011 года точности определения поправок Всемирного времени не хуже 70 мкс, а координат полюса – не хуже 0,001 угловой секунды. Внедрение СПС P1002M на всех радиотелескопах комплекса обеспечило дальнейшее повышение точности определения групповой задержки сигнала, позволило перейти к регулярным РСДБ-наблюдениям по отечественным и международным программам и провести за период 2011 – 2015 годов более 1700 сеансов наблюдений. При этом высокая надежность работы систем P1002M стала одним из факторов, позволивших перейти от еженедельных к ежедневным наблюдениям и достичь для точности определения поправок Всемирного времени значений 63 мкс по оперативным часовым сессиям и 37 мкс по суточным сессиям.

Предложенные принципы, основанные на использовании субдискретизации и нового международного формата данных VDIF, а также размещении системы непосредственно на антенне с передачей выходных данных по волоконно-оптическим линиям через стандартный интерфейс позволили впервые в стране создать широкополосную систему преобразования с цифровой обработкой сигналов на промежуточных частотах до 1,5 ГГц для радиотелескопов РТ-13. Она дала возможность в радиоинтерферометре нового поколения компенсировать потери чувствительности из-за сокращения диаметров антенн. При разработке ШСПС предложен алгоритм автоматической регулировки усиления, основанный на поддержании оптимального соотношения между среднеквадратическим значением напряжения шумового сигнала и максимально допустимым напряжением на входе АЦП, который позволяет практически исключить влияние на работу СПС как шума квантования в АЦП, так и ограничения сигнала в нем. Установлено, что при использовании субдискретизации получаемая в СПС совокупность отсчетов сигнала не зависит от того, в какой зоне Найквиста располагается ограниченный по частоте спектр входного шумового сигнала. Это дает возможность сопряжения ШСПС с радиоастрономическими приемными устройствами, использующими любой способ преобразования частоты сигнала. Экспериментально доказано, что использование разработанной ШСПС при РСДБ-наблюдениях на радиотелескопах РТ-32 позволяет даже для источников со спектральной плотностью мощности излучения менее 0,1 Ян получать корреляционный отклик с отношением сигнал/шум около 100. Так же доказано, что чувствительность и точность определения групповой задержки сигнала для радиоинтерферометра даже только с одним каналом шириной 400 МГц на каждом радиотелескопе близки по значению к соответствующим параметрам 8-канального радиоинтерферометра с каналами шириной 16 МГц и синтезом полосы частот шириной 736 МГц.

В заключении также обозначены перспективы дальнейшего развития представленной в работе тематики.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИСЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. *Ипатов А. В., Кольцов Н. Е. и др.* Система преобразования сигналов для радиоинтерферометров со сверхдлинными базами / Ипатов А. В., Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.** // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2003. – №6. – С. 67 – 78.
2. *Ипатов А. В., Кольцов Н. Е. и др.* Модуль видеоконверторов радиоинтерферометрического терминала / Ипатов А. В., Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.** // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2006. – №6. – С. 175 – 176.
3. *Ипатов А. В., Кольцов Н. Е. и др.* Радиоинтерферометрический терминал обсерватории «Бадары» / Ипатов А. В., Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.** // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2009. – №1. – С. 52 – 57.
4. *Гренков С. А., Кольцов Н. Е. и др.* Цифровой преобразователь сигналов для радиоастрономических систем / Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Носов Е. В., **Федотов Л. В.** // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2009. – №5. – С. 80 – 89.
5. *Гренков С. А., Кольцов Н. Е. и др.* Цифровая радиоинтерферометрическая система преобразования сигналов / Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Носов Е. В., **Федотов Л. В.** // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2010. – №5. – С. 60 – 66.
6. **Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. и др.** Цифровая система преобразования сигналов для астрономических радиоинтерферометров с небольшими антеннами / Федотов Л. В., Кольцов Н. Е., Носов Е. В., Гренков С. А. // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2011. – №6. – С. 21 – 26.
7. *Финкельштейн А. М., Ипатов А. В. и др.* Геодинамические наблюдения на РСДБ-сети «Квазар-КВО» в 2009-2011 гг / Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Скурихина Е. А., Смоленцев С. Г., Суркис И. Ф., **Федотов Л. В.** // Письма в Астрономический журнал. – М.: Наука, 2012. – Том 38, №6. – С. 446 – 451.
8. **Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. и др.** Система преобразования сигналов S/X диапазона волн для радиоинтерферометра оперативного мониторинга Всемирного времени / Федотов Л. В., Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В. // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2013. – №3. – С. 101 – 108.
9. **Федотов Л. В., Кольцов Н. Е. и др.** Результаты испытаний радиоинтерферометра с цифровым преобразованием сигналов в полосе 400 МГц / Федотов Л. В., Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Гренков С. А., Носов Е. В., Мельников А. Е. // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2014. – №1. – С. 72 – 76.

10. *Маршалов Д. А., Носов Е. В. и др.* Системы преобразования сигналов радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО» / Маршалов Д. А., Носов Е. В., **Федотов Л. В.** // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск: СибГАУ, 2014. – № 4 (56). – С. 81 – 87.

11. *Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А. и др.* Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономических радиоинтерферометров / Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В., **Федотов Л. В.** // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – СПб.: СПбГЭТУ, 2014. – Вып.1. – С. 34 – 40.

Публикации в других научных изданиях

12. *Крохалев А. В., Федотов Л. В.* Квадратурный преобразователь частоты на мостах Ланге для регистрирующих РСДБ-терминалов // Сообщ. ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2000. – №132. – 15 с.

13. *Климов С. Д., Кольцов Н. Е. и др.* Двухполосный конвертор модульной РСДБ-системы преобразования сигналов / Климов С. Д., Кольцов Н. Е., Лубешкин Н. Г., **Федотов Л. В.** // Сообщ. ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2000. – №134. – 29с.

14. *Климов С. Д., Кольцов Н. Е. и др.* Многоканальная РСДБ-система преобразования сигналов в диапазоне 100-1000 МГц / Климов С. Д., Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.** // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2000. – Вып.5. – С. 123 – 128.

15. *Климов С. Д., Кольцов Н. Е. и др.* Базовые конверторы для регистрирующего РСДБ-терминала с параметрами Mark-4 / Климов С. Д., Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.** // Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века. – СПб.: ИПА РАН, 2000. – С. 394 – 395.

16. **Федотов Л. В.** Квадратурный преобразователь частоты РСДБ-конвертора // Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века. – СПб.: ИПА РАН, 2000. – С. 416 – 417.

17. **Федотов Л. В.** Методика расчета фазосдвигающих цепей видеоконвертора РСДБ-терминала // Сообщ. ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2002. – №146. – 19 с.

18. *Ipatov A., Koltsov N. et al.* The Data Acquisition System Developed for Quasar Network / Ipatov A., Koltsov N., **Fedotov L.** // IVS 2004 General Meeting Proceedings. Ottawa, Canada, February 9-11, 2004 – USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2005. – P. 243 – 247.

19. *Ipatov A., Koltsov N. et al.* Institute of Applied Astronomy Technology Development Center / Ipatov A., Koltsov N., Mardyshkin V., **Fedotov L.** // IVS 2004 Annual Report. – USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2005. – P. 268 – 271.

20. **Федотов Л. В., Лубешкин Н. Г.** Интегрально-гибридный распределитель сигналов промежуточных частот радиотелескопа // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2005. – Вып.12. – С. 191 – 197.
21. **Кольцов Н. Е., Климов С. Д. и др.** Результаты разработки базового модуля системы преобразования сигналов для РСДБ / Кольцов Н. Е., Климов С. Д., Крохалев А. В., **Федотов Л. В.** // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2005. – Вып.12. – С. 167 – 190.
22. **Гренков С. А., Лавров А. С. и др.** Система управления модернизированной аппаратурой преобразования сигналов РСДБ-терминала / Гренков С. А., Лавров А. С., Михайлов А. Г., **Федотов Л. В.** // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2005. – Вып.12. – С. 198 – 209.
23. **Бердников А. С., Федотов Л. В.** Вideoконвертор системы преобразования сигналов РСДБ-радиотелескопа // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2005. – Вып.13. – С. 401 – 405.
24. **Ipatov A., Berdnikov A. et al.** Institute of Applied Astronomy Technology Development Center / Ipatov A., Berdnikov A., Marshalov D, Melnikov A., Kharinov M., Mikhailov A., **Fedotov L.** // IVS 2005 Annual Report. – USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2006. – P. 286 – 289.
25. **Федотов Л. В.** Итоги создания первой отечественной многоканальной РСДБ-системы преобразования сигналов и ее применение в комплексе «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2007. – Вып.16. – С. 139 – 147.
26. **Кольцов Н. Е., Федотов Л. В.** РСДБ-терминалы комплекса «Квазар-КВО» // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2007. – Вып.17. – С. 298 – 303.
27. **Fedotov L.** VLBI Terminal in Badary Observatory // Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, 12-13 April 2007. – Wien, Austria: Institutes of the Course on Geodesy and Geoinformation of the Vienna University of Technology, 2007. – P. 222 – 224.
28. **Федотов Л. В.** РСДБ-терминалы: современное состояние и перспективы развития // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2008. – Вып.19. – С. 98 – 108.
29. **Носов Е. В., Федотов Л. В.** Цифровой видеоконвертор для системы преобразования сигналов РСДБ-радиотелескопа // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2008. – Вып.19. – С. 109 – 126.
30. **Гренков С. А., Кольцов Н. Е. и др.** Цифровая система преобразования сигналов нового поколения для российской РСДБ сети / Гренков С. А., Кольцов Н. Е., Носов Е. В., **Федотов Л. В.** // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2010. – Вып.21. – С. 3 – 13.
31. **Nosov E., Grenkov S. et al.** The Digital Data Acquisition System for the Russian VLBI-network of New Generation / Nosov E., Grenkov S., Marshalov D., **Fedotov L.** // IVS 2010 General Meeting Proceedings. – USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2010. – P. 400 – 404.

32. *Финкельштейн А. М., Ипатов А. В. и др.* Определение параметров вращения Земли из наблюдений на РСДБ-сети «Квазар-КВО» / Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Гаязов И. С., Скурихина Е. А., Курдубов С. Л., Суркис И. Ф., Смоленцев С. Г., Сальников А. И., Иванов Д. В., Рахимов И. А., **Федотов Л. В.**, Дьяков А. А., Сергеев Р. Ю. // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2012. – Вып.23. – С. 55 – 60.
33. *Федотов Л. В., Носов Е. В. и др.* Эффективность замены аналоговых систем преобразования сигналов на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО» системой P1002M с цифровой обработкой сигналов / Федотов Л. В., Носов Е. В., Бердников А. С., Гренков С. А., Маршалов Д. А., Крохалев А. В., Кольцов Н. Е. // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2012. – Вып.23. – С. 218 – 223.
34. *Финкельштейн А. М., Ипатов А. В. и др.* РСДБ-системы для поддержки глобальной навигационной системы «ГЛОНАСС» / Финкельштейн А. М., Ипатов А. В., Гаязов И. С., Мардышкин В. В., Михайлов А. Г., Суркис И. Ф., Ильин Г. Н., Иванов Д. В., Кайдановский М. Н., Сальников А. И., **Федотов Л. В.**, Варганов М. Е. // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2012. – Вып.24. – С. 12 – 23.
35. *Федотов Л. В., Носов Е. В. и др.* Новое поколение систем преобразования сигналов для перспективных РСДБ-комплексов на антеннах малого диаметра / Федотов Л. В., Носов Е. В., Бердников А. С., Маршалов Д. А., Гренков С. А., Кольцов Н. Е. // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2012. – Вып.24. – С. 165 – 171.
36. *Носов Е. В., Гренков С. А. и др.* Цифровой преобразователь сигналов для радиоинтерферометра на малых антеннах / Носов Е. В., Гренков С. А., **Федотов Л. В.** // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2012. – Вып.24. – С. 206 – 211.
37. *Гренков С. А., Носов Е. В. и др.* Программы оперативного тестирования каналов радиоинтерферометрической системы с цифровыми видеоконверторами / Гренков С. А., Носов Е. В., **Федотов Л. В.** // Труды ИПА РАН. – СПб.: Наука, 2012. – Вып.24. – С. 305 – 309.
38. *Marshall D., Nosov E. et al.* Institute of Applied Astronomy Technology Development Center / Marshall D, Nosov E. V., **Fedotov L.**, Ivanov D., Karpichev A. // IVS 2011 Annual Report. – USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2012. – P. 287 – 290.
39. *Ipatov A., Smolentsev S. et al.* The state-of-the-art of Russian VLBI network / Ipatov A., Smolentsev S., Salnikov A., Syrakis I., Gayazov I., Kurdubov S., Rahimov I., Diakov A., Spilevsky V., Melnikov A., Zimovsky V., Skurikhina E., **Fedotov L.** // Proceedings of the 21st Meeting of the European VLBI Group for Geodesy and Astronomy. Report of the Finnish Geodetic Institute. – Kirkkonummi, Finland: Finnish Geodetic Institute, 2013. – P. 155 – 158.
40. *Федотов Л. В.* Системы преобразования и регистрации сигналов – разработка и внедрение // История науки и техники. – М.: Научтехлитиздат, 2013. – №3. – С. 58 – 63.

41. *Marshalov D., Nosov E. et al.* Institute of Applied Astronomy Technology Development Center / Marshalov D, Nosov E. V., **Fedotov L.** // IVS 2012 Annual Report. – USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2013. – P. 339 – 341.

42. *Бердников А. С., Гренков С. А. и др.* Перспективная цифровая широкополосная система преобразования сигналов BRAS для РСДБ-радиотелескопов / Бердников А. С., Гренков С. А., Крохалев А. В., Маршалов Д. А., Носов Е. В., **Федотов Л. В.**, Кольцов Н. Е. // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2013. – Вып.27. – С. 96 – 101.

43. *Ипатов А. В., Смоленцев С. Г. и др.* Ежедневные оперативные определения всемирного времени по наблюдениям РСДБ-комплекса «Квazar-КВО» / Ипатов А. В., Смоленцев С. Г., Гаязов И. С., Курдубов С. Л., Скурихина Е. А., Суркис И. Ф., Зимовский В. Ф., Иванов Д. В., Мардышкин В. В., Михайлов А. Г., Мельников А. Е., Сальников А. И., **Федотов Л. В.**, Безруков И. А., Яковлев В. А. // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2013. – Вып.27. – С. 237 – 242.

44. *Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А. и др.* Экспериментальные исследования прототипа цифровой широкополосной системы преобразования сигналов на радиоинтерферометре комплекса «Квazar-КВО» / Кольцов Н. Е., Маршалов Д. А., Носов Е. В., **Федотов Л. В.**, Мельников А. Е., Зимовский В. Ф. // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2013. – Вып.27. – С. 477 – 482.

45. *Маршалов Д. А., Носов Е. В. и др.* Состояние и перспективы отечественных РСДБ-систем преобразования и регистрации сигналов на радиотелескопах / Маршалов Д. А., Носов Е. В., **Федотов Л. В.** // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2014. – Вып.28. – С. 28 – 35.

46. *Ipatov A., Ivanov D. et.al.* Russian VLBI System of New Generation / Ipatov A., Ivanov D., Ilin G., Smolentsev S., Varganov M., Gayazov I., Kajdanovsky M., Mardyshkin V., **Fedotov L.**, Salnikov A., Mikhailov A. // VGOS: The New VLBI Network. IVS 2014 General Meeting Proceedings. – Beijing, China: Science Press, 2014. – P. 25 – 29.

47. *Nosov E., Berdnikov A. et.al.* Current Development State of the Russian VLBI Broadband Acquisition System / Nosov E., Berdnikov A., Grenkov S., Marshalov D., **Fedotov L.**, Melnikov A. // VGOS: The New VLBI Network. IVS 2014 General Meeting Proceedings. – Beijing, China: Science Press, 2014. – P. 82 – 85.

48. *Melnikov A., Berdnikov A. et.al.* First Fringes with BRAS on Network “Quasar” / Melnikov A., Berdnikov A., Grenkov S., Marshalov D., **Fedotov L.**, Mikhailov A., Nosov E. // VGOS: The New VLBI Network. IVS 2014 General Meeting Proceedings. – Beijing, China: Science Press, 2014. – P. 134 – 137.

49. *Маршалов Д. А., Бердников А. С. и др.* Результаты предварительных испытаний широкополосной цифровой системы преобразования сигналов для радиотелескопов / Маршалов

Д. А., Бердников А. С., Гренков С. А., Крохалев А. В., Носов Е. В., **Федотов Л. В.**, Шеманаев А. В. // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2015. – Вып.32. – С. 27 – 33.

50. **Федотов Л. В.** Системы преобразования сигналов для РСДБ // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2015. – Вып. 34. – С. 3 – 74.

51. *Ipatov A., Ivanov D. et. al.* Russian Radio Interferometer of New Generation / Ipatov A., Ivanov D., Ilin G., Olifirov V. Mardyshkin V., Surkis I., **Fedotov L.**, Gayazov I., Stempkovsky V., Bondarenko Y. // Proceedings of the 22nd European VLBI Group for Geodesy and Astrometry Working Meeting. 18-21 May 2015. – Ponta Delgada, Azores Portugal, 2015. – P. 75 – 79.

Патенты

52. Пат. на полезную модель 44019, Рос. Федерация, МПК7 Н 01 В 1/16, Н 03 D 7/18. Широкополосный видеоконвертор шумовых сигналов / Ипатов А. В., Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.**; заявитель и патентообладатель ИПА РАН. — Заявл. 12.10.04; опубл. 10.02.05, Бюл. № 4. — 8 с.

53. Пат. на полезную модель 59310, Рос. Федерация, МПК7 G 11 В 5/09. Радиоинтерферометрическая система регистрации сигналов // Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.**; заявитель и патентообладатель ИПА РАН. — Заявл. 13.06.06; опубл. 10.12.06, Бюл. № 34. — 4 с.

54. Пат. на полезную модель 80616, Рос. Федерация, МПК7 Н 01 В 1/16, Н 03 D 7/18. Видеоконвертор радиоинтерферометра / Кольцов Н. Е., Носов Е. В., **Федотов Л. В.**; заявитель и патентообладатель ЗАО «РЭЛТА». — Заявл. 22.08.2008; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. — 8 с.

55. Пат. на полезную модель 122810, Рос. Федерация, МПК7 Н 03 D 7/00. Система преобразования и регистрации сигналов для радиоастрономического интерферометра / Ипатов А. В., Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.**; заявитель и патентообладатель ИПА РАН. — Заявл. 31.10.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. — 9 с.

56. Пат. на полезную модель 130463, Рос. Федерация, МПК7 Н 03 D 7/00. Широкополосный канал преобразования сигналов для радиоинтерферометра / Кольцов Н. Е., Носов Е. В., **Федотов Л. В.**; заявитель и патентообладатель ИПА РАН. — Заявл. 04.02.2013; опубл. 20.07.2013, Бюл. № 20. — 9 с.

57. Пат. на полезную модель 156823, Рос. Федерация, МПК7 Н 03 D 7/00. Канал преобразования сигналов для радиоинтерферометра / Кольцов Н. Е., **Федотов Л. В.**; заявитель и патентообладатель ИПА РАН. — Заявл. 21.04.2015; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32. — 9 с.