На правах рукописи

НОСОВ Евгений Викторович

Цифровые преобразователи сигналов для радиоинтерферометров со сверхдлинными базами

Специальность 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2016

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

Научный руководитель:
Федотов Леонид Васильевич — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ИПА РАН.

Официальные оппоненты:
Богод Владимир Михайлович — доктор физико-математических наук, заведующий Санкт-Петербургским филиалом Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН), г. Санкт-Петербург.

Каневский Борис Зиновьевич — кандидат физико-математических наук, заведующий отделом приемо-передающих комплексов Астрокосмического центра учреждения Российской академии наук Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (АКЦ ФИАН), г. Москва.

Ведущая организация:
Научно-исследовательский радиофизический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского» (НИРФИ ННГУ)

Защита состоится 27 декабря 2016 г. в 10 часов 00 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.iaaras.ru

Автореферат разослан _____2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук Ю.С. Бондаренко

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

Радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ) в настоящее время является одним из основных методов радиоастрономических исследований, который позволяет решать не только проблемы астрофизики и звездной астрономии, но и прикладные задачи по высокоточному определению параметров вращения Земли. Для проведения РСДБ-наблюдений на каждом радиотелескопе требуется выполнить ряд преобразований принимаемых сигналов, чтобы стала возможной их регистрация и передача в центр корреляционной обработки (ЦКО) для дальнейшего получения научных данных. Для реализации этих функций радиотелескопы оснащаются системой преобразования сигналов (СПС), в каждом канале которой необходимо выделить сигнал в заданном участке выходного диапазона частот приемной системы, перенести его спектр в область видеочастот с разделением верхней и нижней боковых полос, сформировать требуемую полосу пропускания канала, осуществить дискретизацию и квантование сигнала и наконец сформировать поток данных в заданном формате для их регистрации и дальнейшей передачи в ЦКО.

До недавнего времени все указанные преобразования осуществлялись с помощью аналоговой аппаратуры. Однако аналоговые устройства по показателям стабильности и надежности работы, минимизации погрешности преобразований, простоты настройки и эксплуатации, совместимости с цифровой аппаратурой регистрации и передачи данных уже не могут удовлетворять постоянно возрастающим требованиям к научным приборам для радиоастрономических исследований. Опыт эксплуатации зарубежных аналоговых СПС Mark IV DAS и VLBA4 DAS в обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» показал, что каналы этих систем обладают значительным разбросом усиления, частотных характеристик, уровня подавления зеркального канала и других параметров, что приводит к ощутимым аппаратурным потерям чувствительности радиоинтерферометра. Кроме того, наблюдается деградация характеристик этих каналов, а их ремонтопригодность сильно ограничена, что приводит к угрозе срыва наблюдательных программ. Поэтому при оснащении радиотелескопов комплекса «Квазар-КВО» новой аппаратурой одной из приоритетных задач стала разработка современных отечественных преобразователей сигналов и каналов СПС на их основе.

Развитие цифровой техники открыло возможность для использования цифровых методов обработки сигналов непосредственно на радиотелескопах и создания цифровых преобразователей для каналов СПС, лишенных недостатков аналоговых устройств. Существенно повысить точность получаемых при РСДБ-наблюдениях данных, в том числе для фундаментального координатно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС, можно было только на основе использования цифровой обработки сигналов при их преобразованиях на радиотелескопах. Поэтому для оснащения радиотелескопов РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» требовалось разработать цифровой преобразователь сигналов видеочастот (до 16 МГц) как основу для построения каналов отечественной СПС. А решение задачи

расширения до 512 МГц полосы пропускания каналов перспективного радиоинтерферометра на радиотелескопах РТ-13 с антеннами малого диаметра было невозможно без создания широкополосного цифрового преобразователя сигналов.

Несмотря на то, что внедрение технологий цифровой обработки сигнала в радиоастрономии является общемировой тенденцией, вопросы проектирования соответствующей аппаратуры были мало освещены в научной литературе. В частности, оставалось не ясно, каковы пути реализации цифровых преобразователей для РСДБ, как их параметры влияют на аппаратурные потери чувствительности, не были разработаны алгоритмы цифровой обработки, решающие задачи преобразования сигналов на РСДБ-радиотелескопе, практически не было примеров внедрения цифровых преобразователей для РСДБ.

Цели и задачи исследования

Диссертационная работа направлена на решение научной задачи повышения эффективности преобразования сигналов на радиотелескопе путем использования цифровых методов обработки сигналов.

Цель диссертационной работы — разработка цифровых преобразователей для систем преобразования сигналов радиотелескопов РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» и перспективного радиоинтерферометра на радиотелескопах РТ-13 с быстроповоротными антеннами малого диаметра.

Для достижения указанной цели требовалось решить следующие основные задачи:

- определить функции и требуемые параметры цифровых преобразователей для РСДБ;
- провести анализ современного состояния работ по созданию цифровых преобразователей сигналов для астрономических радиоинтерферометров;
- исследовать влияние аналого-цифрового преобразования и цифровой обработки сигналов на потери чувствительности радиоинтерферометра и выработать критерии выбора параметров цифровых преобразователей для ограничения потерь заданным уровнем;
- исследовать методы построения цифрового широкополосного фазовращателя для разделения боковых полос сигнала и разработать цифровой преобразователь сигналов видеочастот для системы преобразования сигналов радиотелескопов РТ-32 комплекса «Квазар-КВО»;
- разработать широкополосный цифровой преобразователь сигналов промежуточных частот для перспективных радиотелескопов РТ-13, позволяющий компенсировать потери чувствительности радиоинтерферометра при переходе к антеннам малого диаметра;
- исследовать параметры цифровых преобразователей сигналов на радиотелескопах РТ-32 и РТ-13 и провести анализ результатов их применения в РСДБ-наблюдениях.

Научная новизна работы

Впервые в стране созданы цифровые преобразователи сигналов для каналов РСДБ-систем, которые позволили за счет своих малых аппаратурных потерь увеличить чувствительность радиоинтерферометра.

Впервые была получена аналитическая зависимость потерь чувствительности радиоинтерферометра от действия джиттера тактового сигнала аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в цифровых преобразователях сигналов для РСДБ.

Впервые аналитически и методами численного моделирования обоснованы требования к основным параметрам цифровых преобразователей сигналов для каналов радиоинтерферометров со сверхдлинными базами, обеспечивающие минимизацию аппаратурных потерь чувствительности радиоинтерферометра при РСДБ-наблюдениях.

Разработан метод создания цифрового широкополосного фазовращателя для разделения боковых полос сигнала с перекрытием по частоте более трех порядков, обеспечивающий малые аппаратные затраты программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) на его реализацию.

Предложены и запатентованы новые технические решения, позволившие создать цифровой преобразователь сигналов видеочастот для СПС радиотелескопов РТ-32 и широкополосный цифровой преобразователь сигналов промежуточных частот для радиотелескопов РТ-13.

Практическая значимость работы

Разработанный цифровой преобразователь сигналов видеочастот обеспечивает идентичность каналов и минимизацию искажений сигналов в СПС Р1002М, которой с 2011 года оснащены все радиотелескопы РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». Это дало возможность повысить эффективность РСДБ-наблюдений на этих радиотелескопах за счет увеличения чувствительности радиоинтерферометра, уменьшения формальной ошибки определения групповой задержки синтезированного отклика, увеличения числа успешно обработанных коррелятором наблюдений, принятых к дальнейшей обработке. Универсальность указанного цифрового преобразователя позволяет использовать его не только в каналах СПС, но и в других радиоастрономических системах, например радиометрических и спектрометрических.

На основе разработанного широкополосного цифрового преобразователя сигналов промежуточных частот создана система, которой оснащены радиотелескопы РТ-13 перспективного радиоинтерферометра, на котором с 2015 года осуществляется измерение поправок Всемирного времени, в том числе в интересах системы ГЛОНАСС.

Методическая и теоретическая основа исследования

В работе использованы аналитические методы исследования, численное моделирование, методы программирования ПЛИС на языках Verilog и VHDL, программирования процессора MicroBlaze на языке Си, схемотехнической разработки и проектирования высокоскоростных цифровых устройств, а также аппарат теоретической радиотехники, теории вероятностей и математической статистики.

Положения, выносимые на защиту

1. Цифровой преобразователь сигналов видеочастот, обеспечивший сокращение аппаратурных потерь чувствительности радиоинтерферометра в каналах системы преобразования сигналов радиотелескопов РТ-32 до уровня 1%.
2. Метод реализации цифрового широкополосного фазовращателя, обеспечившего эффективное разделение боковых полос сигнала в РСДБ-видеоконверторе и практически полное устранение потерь чувствительности радиоинтерферометра от помех по зеркальному каналу.
3. Широкополосный цифровой преобразователь сигналов промежуточных частот для каналов радиоинтерферометра с шириной полосы регистрации 512 МГц, компенсирующий потери чувствительности из-за уменьшения диаметра антенн при переходе к радиотелескопам РТ-13.
4. Результаты сравнительных РСДБ-наблюдений с использованием цифровых преобразователей сигналов в составе приемно-регистрирующих систем радиотелескопов, подтвердившие преимущества их использования по сравнению с аналоговой аппаратурой.

Публикации по теме диссертации и личный вклад автора

По теме диссертации опубликованы 7 научных статей в рецензируемых журналах из списка ВАК [1–7] и 21 публикация в других научных изданиях [8–28], получено 2 патента на полезные модели [29, 30].

В создании цифровых преобразователей сигналов и статьях, написанных в соавторстве, а также в патентах на полезные модели личный вклад автора диссертации состоит в следующем:

- исследование принципов построения, алгоритмов и функциональных схем, схемотехническая разработка и проектирование аппаратной части, а также реализация в ПЛИС необходимых алгоритмов обработки сигнала и других функций цифрового преобразователя сигналов видеочастот [1–2, 6, 8–9, 15, 29] и широкополосного цифрового преобразователя сигналов промежуточных частот [3–4, 6–7, 11, 13–14, 18–20, 24, 25, 30].
- исследование и разработка алгоритмов тестирования и оперативного контроля параметров каналов систем преобразования сигналов на радиотелескопах в ПЛИС цифровых преобразователей сигналов [17, 22].
- участие в подготовке и проведении экспериментальных РСДБ-наблюдений с использованием цифрового преобразователя сигналов видеочастот [6, 16, 23] и широкополосного цифрового преобразователя сигналов промежуточных частот [5, 6, 21, 23, 26–28], а также последующем анализе полученных данных.

Степень достоверности и апробация результатов

Разработанные автором цифровые преобразователи сигналов внедрены и успешно эксплуатируются в составе систем преобразования сигналов на всех радиотелескопах РТ-13 и РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» при проведении всех РСДБ-наблюдений как по отечественным, так и по международным научным программам.

Основные положения и результаты работы обсуждались на научных семинарах ИПА РАН, а также на 6 российских и 10 международных научных конференциях и симпозиумах:

1. III научно-техническая конференция молодых специалистов по радиоэлектронике, ОАО «Авангард», Санкт-Петербург, 15.04.2010.
2. Всероссийская астрономическая конференция «От эпохи Галилея до наших дней», Нижний Архыз, 12–19.09.2010.
3. IVS General Meeting 2010 «VLBI2010: From Vision to Reality», Hobart, Australia, 7–13.02.2010.
4. 20th EVGA Meeting. Bonn, Germany, 29–31.03.2011.
5. Всероссийская радиоастрономическая конференция ВРК-2011 «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии», Санкт-Петербург, 17–21.10.2011.
6. IVS VLBI2010 Workshop on Technical Specifications (TecSpec), Bad Kötzting/Wettzell, Germany, 1–2.03.2012.
7. EVN Technical and Operations Group (TOG) Meeting, Onsala, Sweden, 27–28.06.2012.
8. 1st International VLBI Technology Workshop, MIT Haystack Observatory, USA, 22–24.10.2012.
9. Пятая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО–2013), Санкт-Петербург, 15–19.04.2013.
10. 8th IVS General Meeting, Shanghai, China, 2–7.03.2014.
11. III Научно-техническая конференция молодых специалистов ОАО «ИСС» «Разработка, производство, испытания и эксплуатация космических аппаратов и систем», Железногорск, 10–12.09.2014.
12. Third International VLBI Technology Workshop, Groningen/Dwingeloo, Netherlands, 10–13.11.2014.
13. Шестая Всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО–2015), Санкт-Петербург, 20–24.04.2015.
14. EVN Technical and Operations Group (TOG) Meeting, Madrid, Spain, 09.02.2016.
15. The 9th IVS General Meeting «New Horizons with VGOS», Johannesburg, South Africa, 13–19.03.2016.
16. 5th International VLBI Technology Workshop, MIT Haystack Observatory, USA, 12–14.10.2016.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и трех приложений. Диссертация содержит 145 страниц, 60 рисунков и 7 таблиц. Список используемой литературы включает 82 наименования.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна и практическая значимость результатов работы, перечислены положения, выносимые на защиту, и публикации, содержащие основные результаты работы, даны сведения об апробации работы на научных конференциях.

В **первой главе** рассматриваются функции видеоконверторов СПС и влияние их параметров на потери чувствительности радиоинтерферометра. Приводится обзор видеоконверторов отечественных и зарубежных систем преобразования сигналов (Mark-IV, VLBI4 и P1000), использовавшихся на радиотелескопах комплекса «Квазар-КВО». Показано, что существовавшие аналоговые видеоконверторы не удовлетворяют современным требованиям РСДБ и ограничивают чувствительность радиоинтерферометра из-за большого разброса характеристик, нестабильности и деградации их во времени, а также низкой ремонтопригодности, приводящей к угрозе срыва научных программ.

Показана необходимость модернизации СПС на радиотелескопах РТ-32, для чего требовалось создать цифровой преобразователь сигналов (ЦПС) видеочастот, который за счет широкого применения методов цифровой обработки сигналов (ЦОС) позволял бы улучшить характеристики системы, обеспечивая малые аппаратурные потери чувствительности радиоинтерферометра.

Кроме того, для оснащения перспективных радиотелескопов РТ-13 требовалось создание широкополосных цифровых преобразователей сигналов промежуточных частот, компенсирующих потери чувствительности радиоинтерферометра от уменьшения площади используемых быстроповоротных антенн. Такие ЦПС должны иметь собственный форматер данных в стандарте VDIF, а также возможность передавать выходные данные по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС).

Анализ современного состояния работ в мире по созданию преобразователей сигналов для РСДБ показал, что мировой тенденцией является создание цифровых преобразователей на основе АЦП и ПЛИС, реализующих преимущества методов ЦОС. При этом методика разработки таких устройств, используемые в них алгоритмы и анализ влияния их параметров на аппаратурные потери чувствительности радиоинтерферометра в литературе практически отсутствуют. Поэтому требовалось проработать комплекс научных и технических вопросов о влиянии параметров ЦПС на аппаратные потери чувствительности радиоинтерферометра, разработать эффективные алгоритмы требуемой цифровой обработки сигналов и способы их аппаратной реализации.

Вторая глава посвящена исследованию влияния аналого-цифрового преобразования и дальнейшей цифровой обработки в каналах радиоинтерферометра на его аппаратурные потери чувствительности. Путем численного моделирования показано влияние эффекта наложения спектров при дискретизации в случае наблюдений на нулевой или малой базе и в случае РСДБ-наблюдений. Установлено и экспериментально подтверждено, что сигналы, попавшие при дискретизации в основную зону Найквиста из соседних зон, в случае

РСДБ-наблюдений не дадут вклад в амплитуду корреляционного отклика и могут рассматриваться как мешающий шум, уменьшающий отношение сигнал/шум (ОСШ). Чтобы ограничить влияние наложения спектров, перед АЦП установлен антиалайзинговый фильтр, для подбора которого при проектировании ЦПС было проведено математическое моделирование, позволившее совместно учесть все эффекты, связанные с видом частотной характеристики фильтра и наложением спектров при дискретизации.

Другим фактором, способным привести к потерям чувствительности при дискретизации сигналов, является джиттер (дрожание фронта) тактового сигнала АЦП. В работе показано, что известные способы учета влияния джиттера некорректны для случая РСДБ-наблюдений. В результате проведенных исследований удалось впервые получить аналитическую зависимость коэффициента потерь чувствительности радиоинтерферометра ξ_j от среднеквадратического значения (СКЗ) джиттера σ_j и ОСШ на входе АЦП SNR_{in}:

$$\xi_j = \frac{1}{1 + 2(SNR_{in} + 1)\left(1 - \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_j} \cdot \frac{\mathrm{erf}\left(\sqrt{2}\pi f_{\text{в}}\sigma_j\right) - \mathrm{erf}\left(\sqrt{2}\pi f_{\text{н}}\sigma_j\right)}{(f_{\text{в}} - f_{\text{н}})}\right)},$$

где erf() — функция ошибок, а $f_в$ и $f_н$ — верхняя и нижняя частоты в спектре входного сигнала, который предполагается прямоугольным. Из полученной зависимости были сформулированы требования к джиттеру в ЦПС видеочастот (не более 271 пс) и широкополосному ЦПС промежуточных частот (не более 3.9 пс), при которых вносимые потери составят менее 0.1%.

Еще одним источником потерь чувствительности является квантование сигнала. В аналоговых системах сигналы квантовались непосредственно перед их записью регистрирующим терминалом до одного или двух бит, и влияние этого квантования хорошо изучено. Однако в ЦПС сигнал сначала квантуется многоразрядным АЦП, после чего происходит необходимая цифровая обработка, после которой уже цифровой сигнал заново квантуется до 2 бит. С помощью численного моделирования показано, что в этом случае потери от квантования в АЦП могут рассматриваться независимо от потерь в выходном 2-битном квантователе. При этом АЦП с разрядностью 5 бит уже достаточно, чтобы потери от квантования в нем составляли менее 1%, что позволяет использовать в ЦПС большинство коммерчески доступных АЦП, так как практически все они имеют разрядность 8 и более бит.

Для достижения малых потерь чувствительности при квантовании необходимо обеспечить оптимальный уровень сигнала на входе АЦП. С помощью численного моделирования была получена зависимость вносимых квантованием потерь чувствительности радиоинтерферометра от уровня входного сигнала для наиболее распространенных разрядностей АЦП. Было установлено, что для обеспечения потерь менее 0.1% необходимо удерживать СКЗ сигнала σ на входе АЦП в диапазоне

$$\frac{18.248 \cdot U_{\text{АЦП}}}{2^q} < \sigma < \frac{U_{\text{АЦП}}}{2.77},$$

где $U_{АЦП}$ — максимально допустимое напряжение на входе АЦП (половина полной шкалы), а q — разрядность АЦП, начиная от 8 бит. Данное неравенство было получено для входного сигнала с нормальным распределением и ОСШ много меньше единицы.

Глава 3 посвящена разработке и испытанию цифрового преобразователя сигналов видеочастот (Рисунок 1), являющегося основой видеоконвертора Р1205М для отечественной СПС Р1002М. В главе обоснованы требования к параметрам ЦПС видеочастот, а также его функции, заключающиеся в разделении боковых полос сигнала после переноса его спектра в область видеочастот, формировании требуемой полосы пропускания канала радиоинтерферометра и выходных 2-битных потоков данных (Рисунок 2). Были сформулированы принципы уменьшения аппаратных затрат ПЛИС при реализации алгоритмов ЦОС, основанные на предельном уменьшении частоты дискретизации сигнала, оптимизации структуры фильтров при децимации и интерполяции, использовании предельной тактовой частоты фильтров и применении фильтров с большим числом нулевых коэффициентов и симметричной импульсной характеристикой.

Рисунок 1. Плата ЦПС видеочастот в кассете видеоконвертора Р1205М.

Для разделения боковых полос сигнала фазовым методом было необходимо реализовать широкополосный фазовый сдвиг 90° во всей полосе пропускания, что является одной из главных проблем как в аналоговых, так и в цифровых видеоконверторах. Для этого автором был разработан метод реализации на ПЛИС широкополосного фазовращателя, основанный на разделении полосы пропускания на несколько частотных каналов, внесении в каждом из каналов требуемого фазового сдвига с помощью пары относительно простых фильтров небольшого порядка с разнесенными строго на 90° ФЧХ и близкими АЧХ и последующем синфазном объединении сигналов от всех каналов с восстановлением исходной частоты дискретизации [12].

Разработанный метод позволил до 20 раз сократить число используемых в ПЛИС умножителей по сравнению с прямой реализацией с помощью комплексного фильтра высокого порядка, при этом реализуемый фазовый сдвиг составил строго 90°, неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания 0.02 дБ, а перекрытие по частоте достигло 6000 раз. Использование данного метода при проектировании ЦПС позволило практически исключить потери чувствительности радиоинтерферометра, связанные с разделением боковых полос сигналов, добившись уровня подавления помех по зеркальному каналу более 40 дБ в большей части полосы пропускания, тогда как типичный уровень подавления для аналоговых видеоконверторов составляет 20–26 дБ.

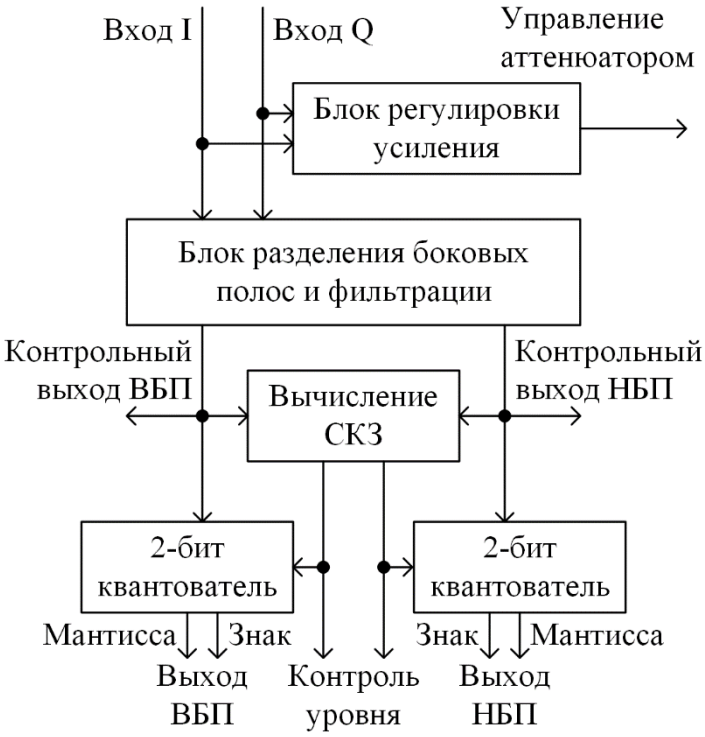

Рисунок 2. Общая структура преобразования сигнала в ПЛИС для ЦПС видеочастот

С помощью цифровых фильтров с конечной импульсной характеристикой, обеспечивающих линейную фазо-частотную характеристику, в ЦПС реализованы полосы пропускания 0.5, 2, 4, 8, 16 МГц (Рисунок 3). Частота дискретизации в ЦПС выбрана равной 64 МГц, что позволило формировать все полосы пропускания до 16 МГц включительно с помощью цифровых фильтров, вносящих существенно меньшие потери по сравнению с аналоговыми фильтрами. Кроме того, это дало возможность при необходимости расширить полосу регистрации видеоконвертора до 32 МГц.

Построенный на основе ЦПС видеоконвертор Р1205М сокращает вносимые аппаратурные потери чувствительности радиоинтерферометра до величины около 1%, что существенно лучше, чем у аналоговых видеоконверторов. Их сравнение в реальных РСДБ-наблюдениях на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» показало увеличение чувствительности радиоинтерферометра при использовании Р1205М примерно на 20% и уменьшение разброса ОСШ между каналами радиоинтерферометра в несколько раз (Рисунок 4) [6, 16]. Кроме того,

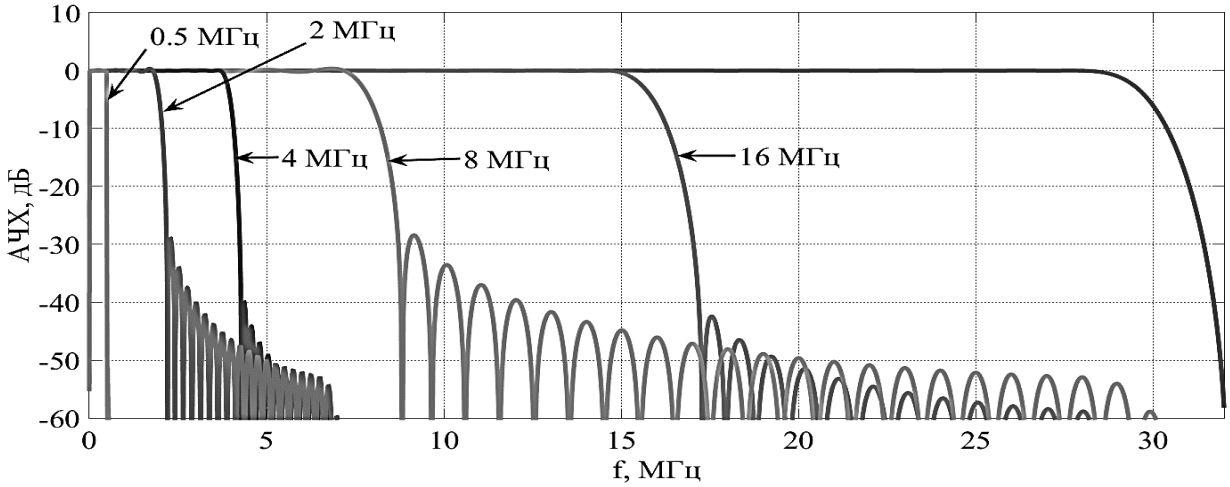

Рисунок 3. АЧХ блока разделения боковых полос и фильтрации в ЦПС видеочастот.

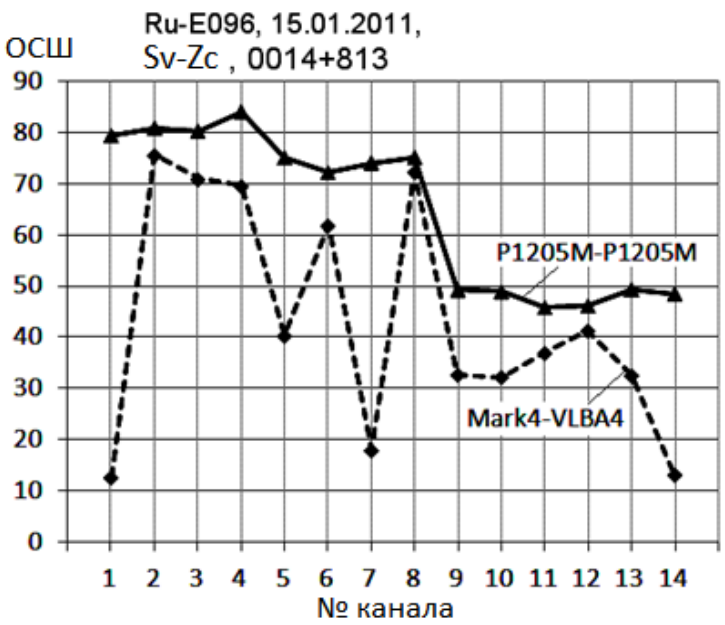

Рисунок 4. ОСШ корреляционных откликов от источника 0014+813, полученных на базе Светлое-Зеленчукская в наблюдениях Ru-E096 от 15.01.2011 с помощью штатных видеоконверторов (пунктирная линия) и видеоконверторов P1205M на основе ЦПС (сплошная линия).

установка СПС P1002M с видеоконверторами P1205M на основе ЦПС на всех радиотелескопах РТ-32 привела к росту числа успешно обработанных наблюдений, повысив эффективность использования радиоинтерферометра [6].

Таким образом, впервые в стране был создан цифровой преобразователь сигналов видеочастот для РСДБ с фазовым разделением боковых полос, формированием заданной полосы пропускания и 2-битным квантованием путем цифровой обработки сигналов на ПЛИС. Он обеспечил модернизацию СПС на всех радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО» и возможность получения высококачественных данных при РСДБ-наблюдениях с сохранением совместимости с существующими аналоговыми системами.

Глава 4 посвящена разработке широкополосного цифрового преобразователя сигналов промежуточных частот для оснащения радиотелескопов РТ-13. Созданный широкополосный ЦПС (Рисунок 5) принимает сигналы от приемного устройства радиотелескопа в диапазоне частот 1024–1536 МГц, производит их аналого-цифровое преобразование с частотой дискретизации 1024 МГц, осуществляя субдискретизацию с переносом спектра из третьей зоны Найквиста, формирует из полученных цифровых отсчетов пакеты данных в соответствии с международным стандартом форматирования РСДБ-данных VDIF и, используя стандартный интерфейс 10G Ethernet, передает эти данные по ВОЛС на систему буферизации и передачи данных радиотелескопа (Рисунок 6).

Широкополосная система преобразования сигналов, созданная на основе разработанных ЦПС, размещается в фокальной кабине радиотелескопа, что затрудняет доступ к оборудованию, мешая его наладке и контролю характеристик. Поэтому в широкополосных ЦПС реализован ряд функций анализа сигналов и самодиагностики, которые полностью компенсируют этот недостаток. Одной из таких функций является выделение из-под шумов сигнала фазовой калибровки, что позволяет найти амплитуды и фазы его гармоник, попавших в полосу пропускания, и оценивать по ним АЧХ и ФЧХ сигнального тракта радиотелескопа, а также анализировать их стабильность во времени, что крайне востребовано при наладке

аппаратуры и в процессе подготовки к РСДБ-наблюдениям. Созданный в ПЛИС блок выделения сигнала фазовой калибровки основан на когерентном усреднении входного сигнала отрезками по 1024 отсчета в течение 1 секунды и передаче усредненных значений в компьютер для частотного анализа [22]. Мощность сигнала фазовой калибровки обычно настраивается так, чтобы составлять 0.01 от общей мощности входного сигнала. В этом случае среднеквадратическая ошибка определения фазы гармоник составляет 0.57°, что вполне достаточно для оценки качества работы оборудования во время наблюдений.

Рисунок 5. Кассета широкополосного ЦПС промежуточных частот

Кроме того, был разработан и реализован в ПЛИС алгоритм контроля качества квантования сигналов и состояния сигнального тракта путем вычисления статистики распределения 2-битных выборок сигнала по уровням квантования, что обеспечивает возможность автоматического обнаружения неполадок и помех в канале при подготовке к РСДБ-наблюдениям [28]. Другие реализованные функции включают измерение мощности входного сигнала, захват короткой выборки сигнала и ее передача в управляющий компьютер для диагностики и частотного анализа, контроль температуры устройства, токов потребления и прочее.

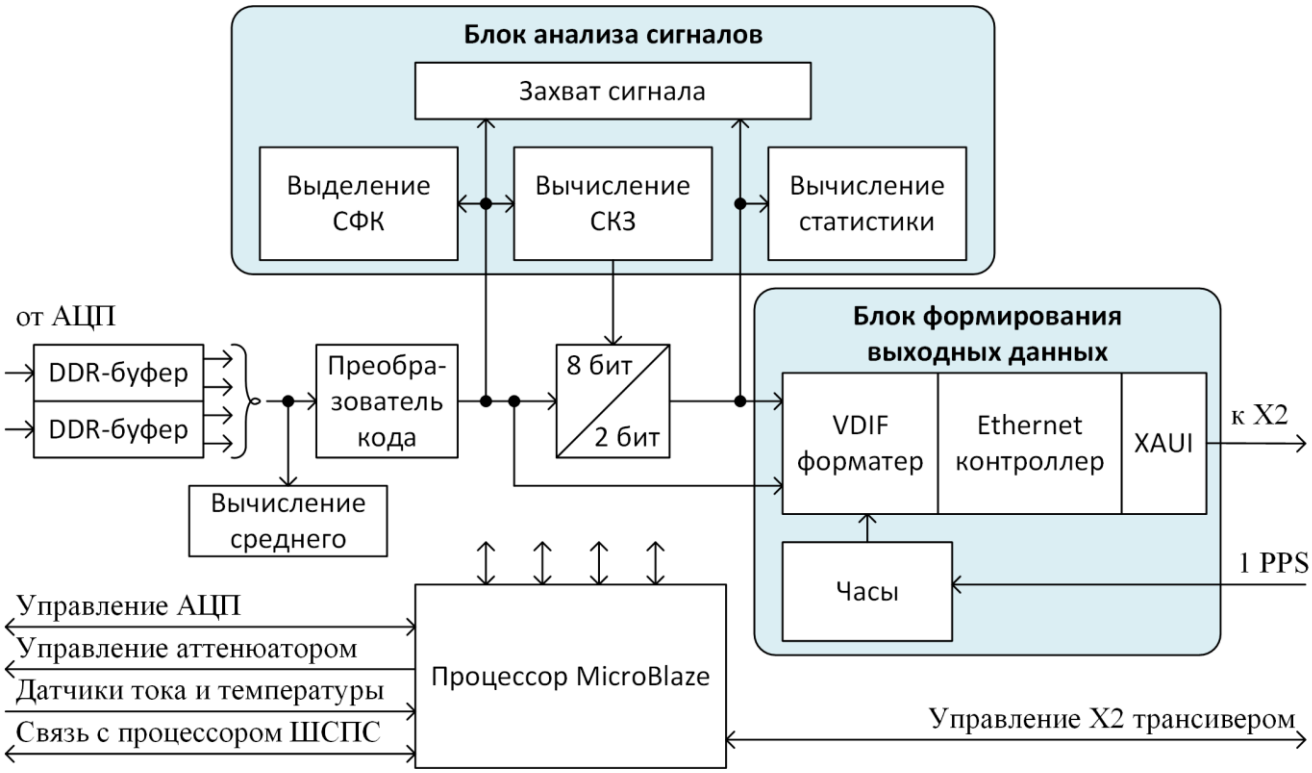

Рисунок 6. Общая структура преобразования сигнала в ПЛИС для широкополосного ЦПС промежуточных частот.

Разработанный форматер данных в стандарте VDIF поддерживает переменную длину VDIF кадров от 1000 до 8192 байт и разрядность выходных данных 2 или 8 бит. Для точной синхронизации данных в форматере реализованы специальные часы, синхронизуемые со шкалой времени радиотелескопа.

Проведенные впервые в стране РСДБ-наблюдения с широкополосной регистрацией сигналов показали, что использование широкополосного ЦПС промежуточных частот на радиотелескопах РТ-32 даже в одном канале позволяет приблизительно в 1.6 раза повысить точность определения временного положения корреляционного отклика по сравнению с использованием обычных узкополосных каналов и синтеза полосы частот [5, 26]. Это открывает возможность наблюдения слабых источников, недоступных ранее для радиотелескопов РТ-32 со штатными узкополосными СПС.

Созданный широкополосный ЦПС позволил оснастить широкополосной СПС все радиотелескопы РТ-13 недавно построенного ИПА РАН радиоинтерферометра [27, 28]. Широкополосные ЦПС с полосой регистрации 512 МГц, установленные на каждом радиотелескопе, обеспечили компенсацию потерь чувствительности радиоинтерферометра, связанных с переходом от 32-метровых антенн к быстроповоротным антеннам малого диаметра, и высокое качество получаемых данных (Рисунок 7) [23]. Созданное оборудование установлено на радиотелескопах РТ-13 с весны 2015 года и на конец первого квартала 2016 года на нем было произведено уже более 500 наблюдений, в том числе международных.

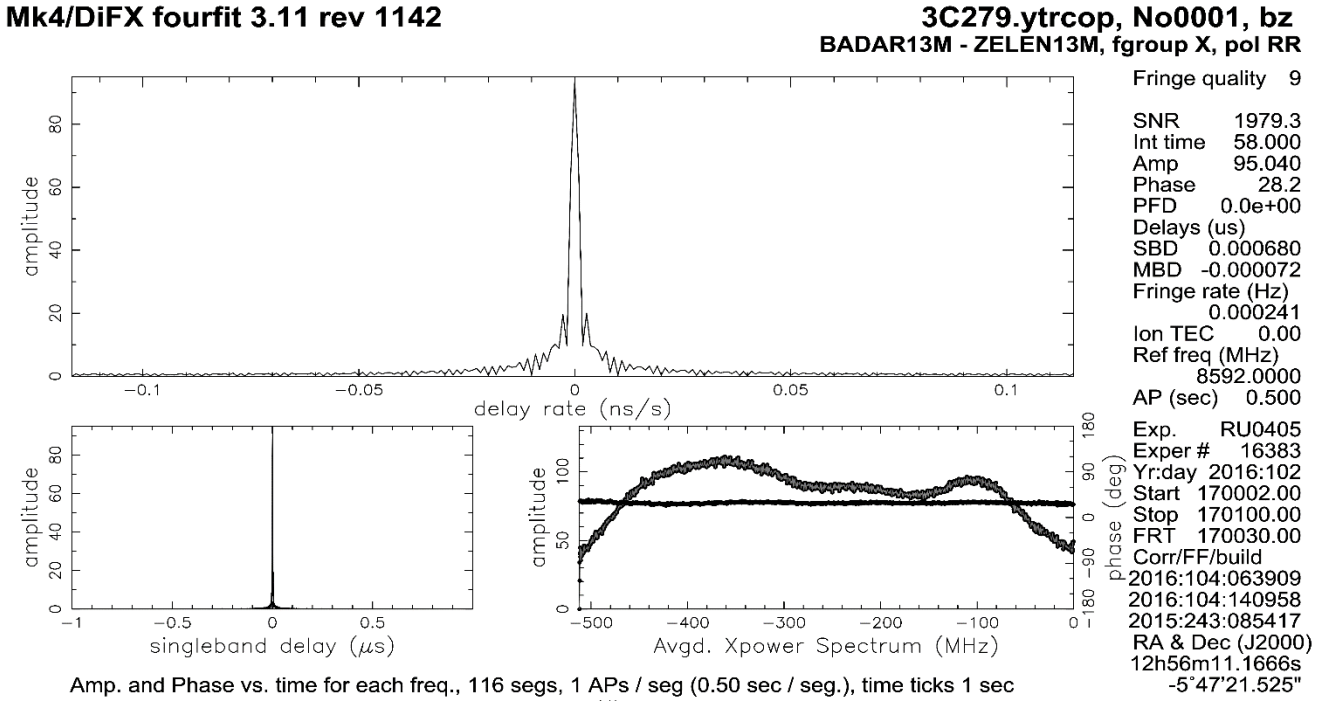

Рисунок 7. Пример корреляционного отклика и кросс-спектра сигналов, полученных в ИПА РАН по результатам обработки наблюдений источника 3C279 в диапазоне длин волн 3.5 см, проведенных с использованием широкополосного ЦПС на базе Зеленчукская–Бадары.

Заключение

В результате проведенных исследований создан ЦПС видеочастот для РСДБ, что позволило оснастить все радиотелескопы РТ-32 РСДБ-комплекса «Квазар-КВО» унифицированными видеоконверторами на основе указанного ЦПС. Качество созданного оборудования и повторяемость характеристик подтверждаются экспериментальными РСДБ-наблюдениями, показавшими рост отношения сигнал-шум в каналах радиоинтерферометра на радиотелескопах РТ-32 примерно на 20% по сравнению с использованием штатных аналоговых систем. Эксплуатация сорока восьми ЦПС в составе штатного оборудования радиотелескопов показала их высокую надежность, совместимость с зарубежными системами и повышение количества успешно обработанных наблюдений.

Оснащение радиотелескопов РТ-13 разработанными широкополосными ЦПС промежуточных частот позволило ИПА РАН первым в мире начать регулярные РСДБ-наблюдения с широкой полосой регистрации для оперативного мониторинга Всемирного времени, в том числе в интересах фундаментального обеспечения системы ГЛОНАСС.

Проведенные исследования по влиянию на аппаратурные потери чувствительности параметров ЦПС и созданию эффективных алгоритмов цифровой обработки на ПЛИС создали базу для разработки следующего поколения ЦПС, способного работать как в широкополосном режиме, с шириной спектра входных сигналов до 1024 МГц, так и в режиме полностью цифровых видеоконверторов (*Носов Е. В.* Модернизация тракта преобразования сигналов на радиотелескопах РТ-32 комплекса «Квазар-КВО». // Труды ИПА РАН.– СПб:ИПА РАН, 2015.– №32.– С.34–47.). Разработка такого многофункционального ЦПС, способного проводить также спектральные и радиометрические наблюдения, уже ведется.

Список опубликованных автором работ по теме диссертации

Публикации автора по теме диссертации в изданиях, включенных в перечень ВАК

1. *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.
2. *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.
3. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е. и др.* Цифровая система преобразования сигналов для астрономических радиоинтерферометров с небольшими антеннами. / Гренков С.А., Кольцов Н.Е., **Носов Е.В.**, Федотов Л.В. // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2011. – №6.– С.21–26.
4. *Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А. и др.* Система преобразования сигналов S/X-диапазона волн для радиоинтерферометра оперативного мониторинга всемирного времени. / Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А., **Носов Е.В.**, Федотов Л.В. // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2013. – №3.– С.101–108.
5. *Гренков С.А., Кольцов Н.Е. и др.* Результаты испытаний радиоинтерферометра с цифровым преобразованием сигналов в полосе 400 МГц. / Гренков С.А., Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А., Мельников А.Е., **Носов Е.В.**, Федотов Л.В. // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 2014. – №1.– С.72–76.
6. *Маршалов Д.А.,* ***Носов Е.В.,*** *Федотов Л.В.* Системы преобразования сигналов радиоинтерферометрического комплекса «Квазар-КВО». // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – Красноярск: СибГАУ, 2014. – №4(56), С.81–87.
7. *Кольцов Н.Е., Маршалов Д.А. и др.* Цифровая система преобразования широкополосных сигналов для астрономического радиоинтерферометра / 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 автора по теме диссертации в других научных изданиях

8. ***Носов Е.В.****, Федотов Л. В.* Цифровой видеоконвертор для системы преобразования сигналов РСДБ-радиотелескопа. // Труды ИПА РАН. – СПб.:Наука, 2008.– №19.– С.109–126.
9. *Dmitry Marshalov,* ***Eugeny Nosov****, Sergey Grenkov, Leonid Fedotov*. The Digital Data Acquisition System for the Russian VLBI Network of New Generation // IVS 2010 General Meeting Proceedings. NASA/CP–2010–215864. – P.400–404.

10. ***Е.В. Носов**, Федотов Л.В.* Цифровой преобразователь на ПЛИС для радиоастрономических систем. // Сборник докладов III научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике. СПб.:Аграф+, 2010. – С.35–42.
11. *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.– №21.– С.3–13.
12. ***Носов Е.В.*** Видеоконвертор с цифровой обработкой сигналов на видеочастотах для системы преобразования сигналов РСДБ радиотелескопа. // Труды ИПА РАН. – СПб.:Наука, 2010.– №21.– С.99–105.
13. ***Nosov E.*** Next-Generation DAS for the Russian VLBI-Network. // Proceedings of 20th EVGA Meeting. Max-Planck-Institut für Radioastronomie.– Bonn, 2011.– P.41–43.
14. *Бердников А.С., Гренков С.А. и др.* Новое поколение систем преобразования сигналов для перспективных РСДБ-комплексов на антеннах малого диаметра / Бердников А.С., Гренков С.А., Маршалов Д.А., Кольцов Н.Е., **Носов Е.В.**, Федотов Л.В. // Труды ИПА РАН.– СПб.: Наука, 2012.– Вып. 24.– С. 165–171.
15. *Dmitry Marshalov, **Evgeny Nosov**, Leonid Fedotov et al.* R1002M Data Acquisition System (DAS). // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2011 Annual Report.– USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2012. – P.287–290.
16. *Бердников А.С., Гренков С.А. и др.* Эффективность замены аналоговых систем преобразования сигналов на радиотелескопах комплекса "Квазар-КВО" системой Р1002М с цифровой обработкой сигналов. / Бердников А.С., Гренков С.А., Маршалов Д.А., Кольцов Н.Е., Крохалев А.В., **Носов Е.В.**, Федотов Л.В. // Труды ИПА РАН.– СПб.: Наука, 2012.– Вып. 23.– С.218–223.
17. *Гренков С.А., Федотов Л.В., **Носов Е.В.*** Программы оперативного тестирования каналов радиоинтерферометрической системы с цифровыми видеоконверторами // Труды ИПА РАН.– СПб.: Наука, 2012.– Вып. 24.– С. 305–309.
18. ***Носов Е.В.**, Гренков С.А., Федотов Л.В.* Цифровой преобразователь сигналов для радиоинтерферометра на малых антеннах // Труды ИПА РАН.– СПб.:Наука, 2012.– Вып. 24.– С. 206–211.
19. *Dmitry Marshalov, **Evgeny Nosov**, Leonid Fedotov.* IAA Technology Development Center Report 2012. // IVS 2012 Annual Report.– USA: NASA, Goddard Space Flight Center, 2012.–P.339.
20. *Бердников А.С., Гренков С.А. и др.* Перспективная цифровая широкополосная система преобразования сигналов BRAS для РСДБ-радиотелескопов. / Бердников А.С., Гренков С.А., Маршалов Д.А., Кольцов Н.Е., Крохалев А.В., **Носов Е.В.**, Федотов Л.В. // Труды ИПА РАН.– СПб.:ИПА РАН, 2013.– Вып. 27.– С.96–101.
21. *Зимовский В.Ф., Кольцов Н.Е. и др.* Экспериментальные исследования прототипа цифровой широкополосной системы преобразования сигналов на радиоинтерферометре комплекса «Квазар-КВО». / Зимовский В.Ф., Кольцов Н.Е.,

Маршалов Д.А., Мельников А.Е., **Носов Е.В.,** Федотов Л.В. // Труды ИПА РАН.– СПб.:ИПА РАН, 2013.– Вып. 27.– С.477–482.

22. ***Носов Е.В.*** Реализация на ПЛИС контроля фазовой калибровки в перспективной широкополосной системе преобразования сигналов. // Труды ИПА РАН.– СПб.:ИПА РАН, 2013.– Вып. 27.– С.499–503.
23. *Д.А. Маршалов,* ***Е.В. Носов,*** *Л.В. Федотов.* Состояние и перспективы отечественных систем преобразования и регистрации сигналов на радиотелескопах. // Труды ИПА РАН.– СПБ.:ИПА РАН, 2014.– №28.– С.28–35.
24. *Бердников А.С., Гренков С.А. и др.* Цифровая широкополосная система преобразования сигналов для радиотелескопов. / Гренков С.А., Федотов Л.В., **Носов Е.В.**, Маршалов Д.А., Крохалев А.В., Бердников А.С. // Сборник докладов XX Международной научно-технической конференции "Радиолокация. Навигация. Связь." (RLNC 2014).– Том 1.– г. Воронеж: НПФ "САКВОЕЕ" ООО, 2014.– С.284–295.
25. *Berdnikov A., Grenkov S. et al.* Current Development State of the Russian VLBI Broadband Acquisition System. / **Nosov E.**, Berdnikov A., Grenkov S., Marshalov D., Melnikov A., Fedotov L. // IVS 2014 General Meeting Proceedings.– Science Press, Beijing, China, 2014.– P.82–85.
26. *Berdnikov A., Grenkov S. et al.* First Fringes with BRAS on VLBI Network “Quasar”. / Melnikov A., Berdnikov A., Grenkov S., Marshalov D., Mikhailov A., **Nosov E.**, Fedotov L. // IVS 2014 General Meeting Proceedings.– Science Press, Beijing, China, 2014.– P.134–137.
27. *Бердников А. С., Гренков С. А. и др.* Результаты предварительных испытаний широкополосной цифровой системы преобразования сигналов для радиотелескопов. / Гренков С.А., Федотов Л.В., **Носов Е.В.**, Маршалов Д.А., Крохалев А.В., Бердников А.С., Шеманаев А.В. // Труды ИПА РАН.– СПБ.:ИПА РАН, 2015.– Вып.32.– С.27–33.
28. **Evgeny Nosov**, Dmitriy Marshalov, Alexey Melnikov. Operating Experience of Broadband Acquisition System on RT-13 Radio Telescopes. // IVS 2016 General Meeting Proceedings. "New Horizons with VGOS". Edited by D. Behrend, K.D. Baver, and K.L. Armstrong.– USA, NASA/CP-2016.– P.53–57.

Патенты

29. *Кольцов Н.Е.,* ***Носов Е.В.****, Федотов Л.В.* Видеоконвертор радиоинтерферометра. // Патент на полезную модель №80616 от 22.08.2008.
30. *Кольцов Н.Е.,* ***Носов Е.В.****, Федотов Л.В.* Широкополосный канал преобразования сигналов для радиоинтерферометра. // Патент на полезную модель №130463 от 20.07.2013.