

На правах рукописи
УДК 520.8.056 (520.27)



Губин Алексей Владимирович

**РАЗРАБОТКА И СОЗДАНИЕ ЦИФРОВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО
АНАЛИЗАТОРА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАДИОИЗОБРАЖЕНИЙ
СИБИРСКОГО СОЛНЕЧНОГО РАДИОТЕЛЕСКОПА**

Специальность 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Иркутск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук
Лесовой Сергей Владимирович

Официальные оппоненты:

Михалев Александр Васильевич,
доктор физико-математических наук, доцент,
ИСЗФ СО РАН, заведующий лабораторией

Богод Владимир Михайлович,
доктор физико-математических наук,
СПбФ САО РАН, заведующий лабораторией

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт прикладной астрономии РАН

Защита состоится « 21 » ноября 2012 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д.212.073.09 при ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Ж-317. Тел./факс: 8(3952)40-50-50, e-mail: zavmts@istu.edu; aad@istu.edu.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет» и в научной библиотеке ФГБУН Института солнечно-земной физики СО РАН.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу ученому секретарю совета Ченскому А.Г.: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, e-mail: zavmts@istu.edu, тел. (3952) 40-52-81

Автореферат разослан « 28 » сентября 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.073.09
кандидат физико-математических наук



А.Г. Ченский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Изменчивость развивающихся в атмосфере Солнца пространственно-временных структур и процессов представляет интерес как с точки зрения физики плазмы, так и с точки зрения прогноза геоэффективных явлений, воздействующих на околоземное космическое пространство. Радиоастрономические наблюдения дают информацию о параметрах плазмы в короне, магнитных полях активных областей и вспышечных процессах, что, в свою очередь, позволяет получать данные об электромагнитной, радиационной и геомагнитной обстановке в ближнем космосе.

Сибирский солнечный радиотелескоп (ССРТ) – один из крупнейших радиоастрономических инструментов мира, предназначенный для изучения солнечной активности в микроволновом диапазоне в полосе частот 5670–5790 МГц. Радиоизображение Солнца формируется в результате вращения вместе с Землей веерной диаграммы направленности, образованной с помощью многочастотного приема. Многочастотный прием реализуется с помощью 500-канального акустооптического приемного устройства.

Основными задачами ССРТ являются:

- исследование микроволнового излучения солнечных вспышек на всем солнечном диске;
- локализация источников быстропротекающих процессов в солнечной короне с целью изучения механизмов первичного энерговыделения во вспышечных областях;
- получение радиоизображений слабых деталей в атмосфере Солнца путем накопления сигнала во времени;
- наблюдение активных областей на всех стадиях их развития на фоне излучения спокойной солнечной атмосферы;
- исследование выбросов корональной массы на фоне излучения солнечного диска.

Во многих областях науки и техники, в частности и в радиоастрономии,

стремительный рост производительности цифровых устройств привел к тенденции более раннего перехода аналогового сигнала в цифровую форму. Появление быстрых и сравнительно недорогих аналого-цифровых преобразователей позволяет устанавливать их непосредственно на антенне, что позволяет избавиться от нестабильностей аналоговых линий передачи и повысить соотношение сигнал/шум при передаче радиосигналов устройствам обработки. Но настоящим прорывом в области цифровой обработки сигналов стало молниеносное развитие цифровых сигнальных процессоров (ЦСП) и программируемых логических интегральных схем (ПЛИС), которые стали одним из основных элементов специализированных систем обработки сигналов. Данные устройства позволяют наиболее эффективно реализовать алгоритмы, требующие высокой вычислительной производительности, такие как быстрое преобразование Фурье, цифровая корреляция и цифровая фильтрация.

В экспериментальной астрофизике эффективность радиоастрономического инструмента, а также качество получаемой с его помощью информации в значительной степени зависит от параметров приемного устройства. Настоящая работа посвящена изучению потенциальных возможностей и недостатков реализации корреляционного режима работы ССРТ с акустооптическим приемником (АОП) и разработке цифрового приемного устройства нового поколения для обеспечения наиболее эффективной работы ССРТ – сложного, уникального инструмента, для которого не всегда применим опыт, накопленный на других радиотелескопах. В соответствии с вышесказанным можно сформулировать цель и область исследования работы.

Целью работы является повышение качества радиоизображений Солнца, получаемых на Сибирском солнечном радиотелескопе. При этом были поставлены и решены следующие задачи:

- минимизация эффектов, связанных с паразитной амплитудной модуляцией, возникающей при использовании метода фазовой модуляции для формирования синфазного/противофазного сигнала;
- разработка и создание программно-аппаратного комплекса регистрации

данных ССРТ с помощью цифрового спектрального анализатора на базе ПЛИС;
– внедрение созданного приемного комплекса в наблюдения солнечной активности на ССРТ.

Область исследования включает разработку и создание программно-аппаратного комплекса для экспериментальных радиоастрофизических исследований, повышающего качество получаемых данных на Сибирском солнечном радиотелескопе, и разработку методики измерения спектра мощности сигналов на основе корреляционного анализа с использованием современных ПЛИС, позволяющей обрабатывать исследуемые сигналы в реальном времени на скорости в несколько раз меньше, чем требуется по критерию Найквиста.

Предмет исследования включает алгоритмы и методы измерения спектра мощности с помощью спектрального коррелятора и реализацию цифровых анализаторов спектра, а также получение радиоизображений Солнца с использованием цифрового спектрального анализатора на Сибирском солнечном радиотелескопе.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Методика демультимплексирования отработана и проверена на компьютерных моделях с использованием интерактивного языка обработки данных IDL. Экспериментальные данные, полученные с использованием тестовых сигналов, идентичны разработанным теоретическим моделям реализации спектрального коррелятора. Физические данные, полученные с помощью цифрового анализатора, совпадают с данными радиоизображений Солнца, полученных с использованием акустооптического приемника. Цифровой спектральный анализатор используется в наблюдениях микроволнового излучения Солнца на Сибирском солнечном радиотелескопе.

Научная новизна

В результате исследований разработан и реализован оригинальный метод регистрации двумерных изображений Солнца на ССРТ при помощи цифрового спектрального анализатора. При этом переход к цифровому виду сигнала проис-

ходит на более ранней стадии, чем в существующих приемных системах подобного рода, до операции получения синфазного/противофазного сигнала.

Проведена серия ежедневных наблюдений на ССРТ. Показано, что с помощью цифрового спектрального анализатора возможны одномерные и двумерные наблюдения Солнца.

Показана возможность создания многоканального анализатора спектра мощности на базе ПЛИС общего назначения для получения спектра широкополосного сигнала в режиме реального времени.

Впервые разработана и реализована методика демультимплексирования данных во временной области, позволяющая обрабатывать требуемую полосу частот в реальном времени на скорости в несколько раз меньше, чем требуется по критерию Найквиста.

Научное и практическое значение

Использование новых принципов и методов регистрации сигналов ССРТ с помощью созданного цифрового спектрального анализатора позволяет полностью избавиться радиоизображения Солнца от эффектов паразитной амплитудной модуляции.

Так как калибровка радиотелескопа осуществляется по самому регистрируемому изображению, избавление полезного сигнала ССРТ от амплитудной модуляции, позволит проводить фазовые калибровки радиоинтерферометра с большей точностью.

Использование разработанного цифрового спектрального анализатора при регистрации одномерных сканов позволяет увеличить чувствительность инструмента в $\sqrt{2}$ раз.

Важнейшим качеством предлагаемой методики является то, что она применяется на алгоритмическом уровне, а не на физическом и не требует какой-либо аппаратной модернизации для изменения параметров приемного устройства.

Защищаемые положения

1. Разработка спектрального анализатора:

- метод вычисления корреляционной функции при расщеплении входного потока данных на несколько субпотокков;
- реализация данного метода с использованием ПЛИС.

2. Цифровой спектральный анализатор в качестве регистрирующего устройства ССРТ позволяет:

- избавиться от паразитной амплитудной модуляции, связанной с манипуляцией фазы для получения синфазных/противофазных компонент сигнала плечей восток-запад (ВЗ) и север-юг (СЮ);
- получать одномерные сканы ВЗ – СЮ и ВЗ + СЮ одновременно без модуляции фазы принимаемых сигналов;
- одновременно регистрировать одномерные сканы ВЗ и СЮ;
- вести запись исходных корреляционных данных и варьировать характеристики спектральных каналов приемника при обработке данных наложением оконных функций на исходные корреляционные данные;
- сохранить принцип получения изображения на ССРТ и использовать уже существующий комплекс программного обеспечения сбора и обработки данных.

Личный вклад автора заключается в разработке методов анализа спектра мощности и алгоритмов для их реализации при расщеплении входных данных, создании комплекса программ и IP-ядер на основе разработанных методик сбора и первичной обработки данных. Автору принадлежат выводы и научные положения, сформулированные в диссертационной работе. Основные результаты диссертации, опубликованные в работах [1–18], являются оригинальными и получены либо автором, либо при его непосредственном участии. Постановка задач, разработка методики демультимплексирования входных и восстановления корреляционных данных выполнены совместно с научным руководителем.

Апробация диссертации и публикации

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

1. Automation, Control and Information Technology – 2005. Novosibirsk.
2. Всероссийская конференция «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности». 2006. САО РАН, Нижний Архыз, КЧР.
3. Радиоастрономическая конференция «Повышение эффективности и модернизация радиотелескопов России». 2008. САО РАН, Нижний Архыз, КЧР.
4. Всероссийская конференция «Солнечно-земная физика», посвященная 50-летию создания ИСЗФ СО РАН. 2010. Иркутск.
5. CESRA Summer School on solar radio physics. 2010. Nancy, France.
6. Всероссийская астрономическая конференция «Методы и инструменты – 2010». САО РАН, Нижний Архыз, КЧР.
7. 13th European Solar Physics Meeting ESPM-13. 2011. Rhodes, Greece.
8. The XI Russian-Chinese conference on space weather. 2012. Irkutsk.
9. Всероссийская радиоастрономическая конференция «Радиотелескопы, аппаратура и методы радиоастрономии» ВРК-2011. Санкт-Петербург, а также на научных семинарах отдела радиоастрофизики и на семинарах радиоастрофизической обсерватории лаборатории мониторинга солнечной активности ИСЗФ СО РАН.

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ и 6 тезисов докладов на конференциях, из них 4 в изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертация общим объемом 124 страницы, в том числе 32 рисунка и 5 таблиц, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы и трех приложений.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована ее важность и актуальность, сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

В **первой главе** рассматриваются способы и приборы для измерения спектра мощности. Наиболее подробно рассмотрен акустооптический преобразователь как основное приемное устройство Сибирского солнечного радиотелескопа. Кратко описаны современные радиотелескопы, использующие различные корреляционные системы в качестве приемных устройств, такие как радиотелескоп в Нью-Мексико, США, «Very Large Array» (VLA), радиointерферометр «Very Large Base Array» (VLBA), принадлежащий Национальной радиоастрономической обсерватории, радиотелескоп, создаваемый институтом ASTRON, Нидерланды, «LOw Frequency ARray» (LOFAR), а также радиотелескопы, находящиеся в стадии строительства и проектирования: Atacama Large Millimeter Array (ALMA, Чили), Frequency-Agile Solar Radiotelescope (FASR, США) и т. д. Это радиотелескопы нового поколения, использующие коррелятор для измерения функций видности. Наиболее интересны приемные системы, совмещающие возможность спектральных измерений на каждой пространственной частоте. В частности, такая схема разрабатывается для радиотелескопов FASR, ALMA и др.

Методом построения радиоизображения на ССРТ является частотное сканирование за счет и вращения Земли (рис. 1). Метод основан на том, что спектр мощности выходного сигнала интерферометра пропорционален распределению радиояркости по углу, соответственно в качестве приемного устройства ССРТ необходимо использовать анализатор спектра. При этом для рабочей полосы частот ССРТ 120 МГц тонкими особенностями спектра солнечного излучения можно пренебречь.

Для измерения параметров Стокса I, V на каждой антенне расположен модулятор, который в настоящее время пропускает круговую поляризацию только одного знака по 7 мс для каждой поляризации. Антенны соединяются волно-

водным трактом, смонтированным по схеме бинарного дерева, что обеспечивает

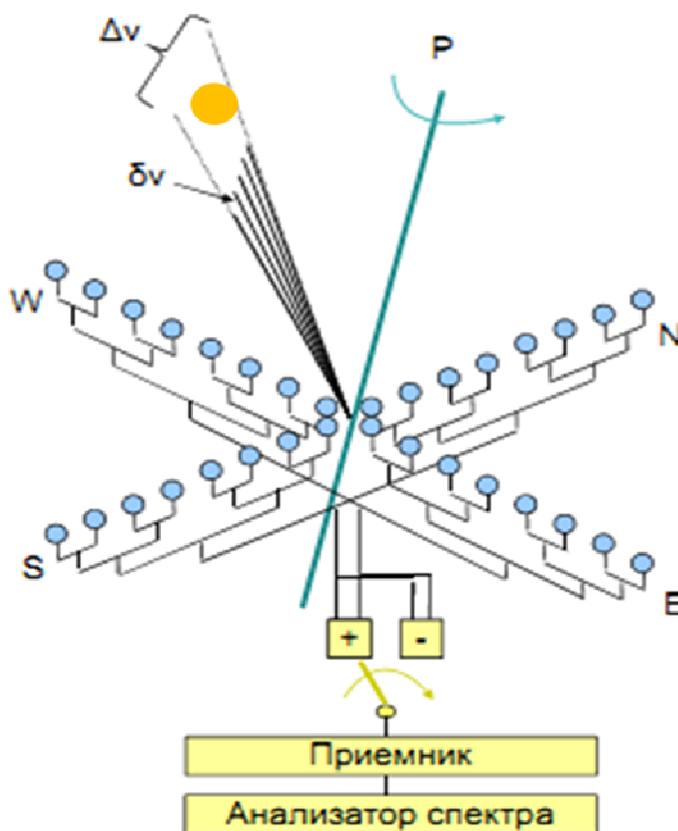


Рис. 1. Принцип формирования радиоизображения на ССРТ.

равенство всех электрических длин в тракте. Далее сигнал передается на приемное устройство.

В цифровой области различают две реализации анализаторов спектра мощности – на основе коррелятора задержек и фурье-преобразования. При реализации фурье-преобразования требуется значительное большее количество операций, и оно больше подходит для программной реализации тогда, когда чаще всего не требуется обработки данных в реальном масштабе времени. В анализаторе на основе коррелятора задержек сначала измеряется авто- или кросскорреляция сигналов, происходит накопление, а затем находится искомый спектр при помощи преобразования Фурье. Система с коррелятором задержек больше подходит для применения на аппаратном уровне, где все сводится к реализации большого числа элементарных операций умножения, сложения, сдвига и т. д. и позволяет строить системы реального времени. Оба эти принципа популярны и используются в зависимости от предъявляемых к анализатору требований.

Существует два типа устройств для реализации систем подобного рода: программируемые логические интегральные схемы и цифровые сигнальные процессоры. Последние выполняют обработку сигналов в реальном времени и имеют фиксированную схемную архитектуру с определенным набором функций, поэтому плохо подходят для систем на стадии разработки, а также для специфических задач, подобных рассматриваемым в данной работе. В свою очередь, стремительный прирост за последние годы скорости и объема логических элементов в ПЛИС делает их применение все более привлекательным для решения задач цифровой обработки сигналов, так как дает возможность не только объединения в любую схемную конфигурацию, но и использования блоков цифровых сигнальных процессоров, находящихся внутри чипа.

Вторая глава посвящена описанию системы с процессором «Nios II», составной частью которого и является IP-модуль коррелятора. Система с процессором «Nios II» – это эквивалент «компьютера в чипе», который содержит процессор и комбинацию периферии и памяти в одном чипе и использует постоянный набор инструкций и модель программирования.

Система с процессором «Nios II» размещается на шине «Авалон», которая состоит из логических элементов и ресурсов маршрутизации внутри ПЛИС. Шина «Авалон» имеет активную шинную архитектуру. Шина «Авалон» поддерживает режим работы мультимастера, такая архитектура обеспечивает большую гибкость в конструкции в system-on-a-programmable chip (SOPC) и необходима при работе внешних устройств с высокой полосой пропускания данных.

Этот принцип и реализован в данной работе, IP-модуль коррелятора является подчиненным устройством процессора «Nios II» и выполняет роль периферийного устройства (рис. 2). Коррелятор осуществляет пересылку данных в память по dma-каналу, что сокращает время операций чтения/записи, освобождает системные ресурсы процессора для других задач и позволяет более эффективно выполнять последовательную передачу данных.

В третьей главе описана структура разработанного спектрального анализатора, который имеет два аналоговых СВЧ-тракта от лучей восток-запад и се-

вер-юг, каждый из которых выполнен по схеме супергетеродинного приемника

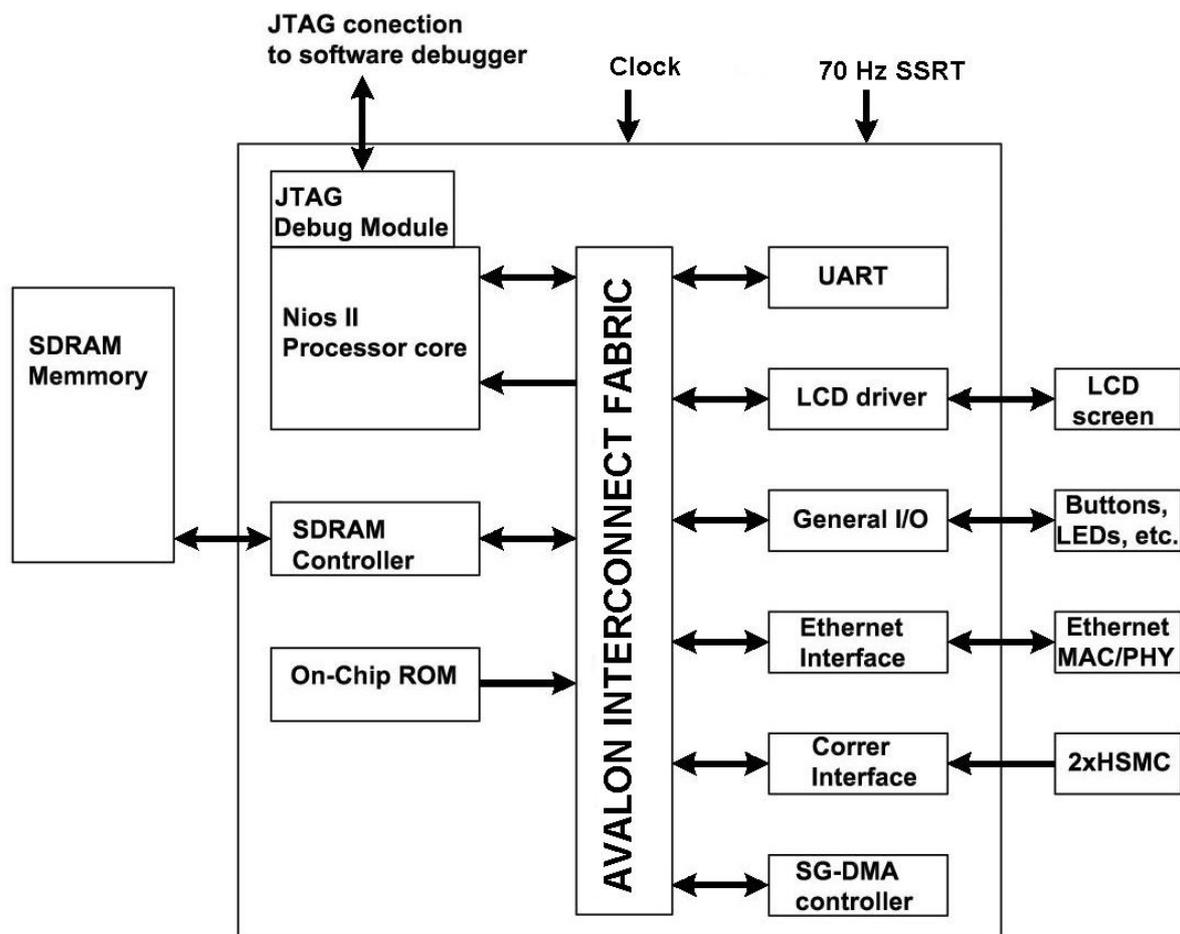


Рис. 2. Система с процессором «Nios II».

с подавлением зеркального канала полосовым волноводным фильтром. Окончательно рабочая полоса частот в 135 МГц формируется антиалиасинговым фильтром на входе аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Наиболее важным при данной схеме получения изображения является то, что фазовые характеристики обоих каналов должны быть идентичными, так как искажения, вносимые фазовыми распределениями, являются некорректируемыми. Наибольший разбег по фазе около 10° дает волноводный фильтр, что вносит статическое искажение до 2 % в получаемое изображение. Цифровая часть реализована на базе отладочного набора фирмы «Альтера S4GX» с ПЛИС семейства «Stratix IV EP4SGX230».

Для формирования радиоизображений Солнца как в одномерном, так и в

двумерном режиме необходимо регистрировать информацию во всей полосе частот ССРТ. Соответственно, вся система должна работать на тактовых частотах от 240 МГц, что не реализуемо даже для топовых линеек ПЛИС, особенно при логической загрузке чипа более 50 %. По мнению автора, выходом из этой ситуации является разбиение входного потока данных на субпотoki (демультиплексирование во временной области), которое позволяет уменьшать скорость обработки за счет увеличения объема производимых вычислений. Впоследствии для каждого субпотoka одного потока измеряется функция кросскорреляции с каждым субпотокom другого (рис. 3). В общем случае демультиплексирование на n субпотокoв можно представить в виде перемножения матриц:

$$\begin{pmatrix} cc_{\beta}^0 \\ cc_{\beta}^1 \\ \vdots \\ cc_{\beta}^{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g_{\zeta+\beta}^0 & g_{\zeta+\beta}^1 & \dots & g_{\zeta+\beta}^{n-1} \\ g_{\zeta+\beta}^1 & g_{\zeta+\beta}^2 & \dots & g_{\zeta+\beta+1}^0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{\zeta+\beta}^{n-1} & g_{\zeta+\beta+1}^0 & \dots & g_{\zeta+\beta+1}^{n-2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_{\zeta+L/n}^0 \\ f_{\zeta+L/n}^1 \\ \vdots \\ f_{\zeta+L/n}^{n-1} \end{pmatrix}$$

где cc – кросскорреляционная функция сигналов f и g , $\beta=0, 1, 2, \dots, 2L$ – определяет число каналов коррелятора, $\zeta=0, 1, 2, \dots$

При демультиплексировании на три субпотoka число корреляторов возрастает в девять раз, но при этом длина каждого такого субкоррелятора уменьшается втрое и соответственно результирующий объем требуемого числа логических элементов возрастает также в три раза. Из этого можно сделать вывод, справедливый для данной методики реализации коррелятора задержек: во сколько раз уменьшается скорость работы коррелятора, во столько же раз увеличивается количество логических ячеек, необходимых для реализации коррелятора с теми же параметрами.

Система сбора информации тактируется глобальной частотой синхронизации ССРТ, по которой корреляционные данные суммарного (ВЗ+СЮ) и разностного (ВЗ–СЮ) сигналов передаются через локальную сеть ССРТ на управляющий компьютер. Управление параметрами коррелятора осуществляется также по локальной сети управляющим компьютером. В ПЛИС реализована SOPC с про-

цессором «Nios II».

Программное обеспечение цифрового спектрального анализатора состоит из двух частей: программы регистрации и программ первичной обработки данных. Компьютер с установленной программой регистрации по TCP/IP-протоколу передачи данных устанавливает связь с приемником,

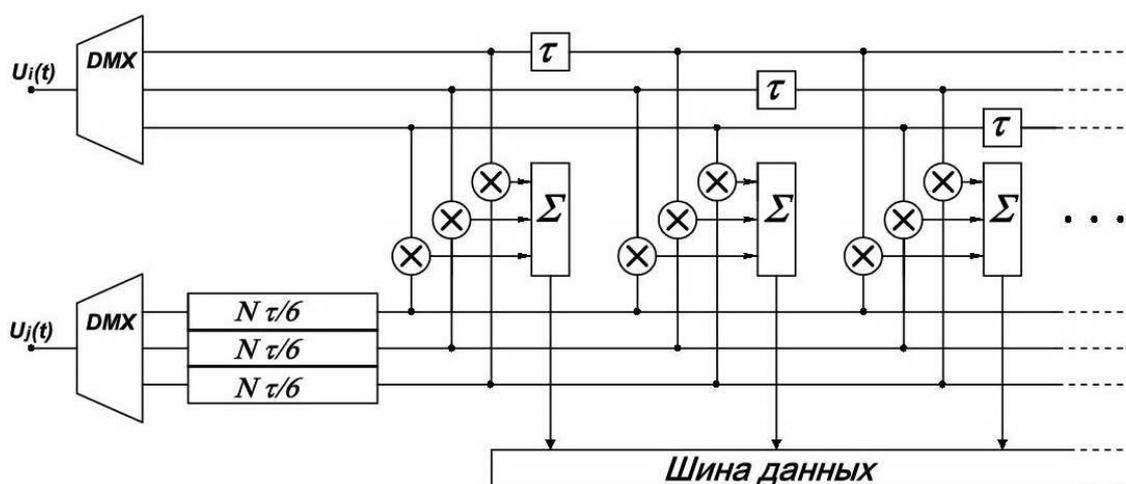


Рис. 3. N-канальный коррелятор с задержками с демультиплексированием входных данных во временной области на три потока субпотока.

инициирует передачу данных, осуществляет демодуляцию сигнала по поляризации, восстанавливает исходный ряд данных после демультиплексирования, выполняет преобразование Фурье для нахождения спектра мощности, сохраняет поток данных на жестком диске и визуализирует текущие данные и состояние приемника. Формат хранения данных полностью совместим с форматом данных, получаемых с АОП, что позволяет использовать существующие программы обработки данных. Одновременно с записью спектральных данных на жесткий диск ведется запись исходных корреляционных данных, обработка которых осуществляется созданным пакетом программ на языке IDL.

Созданный программно-аппаратный комплекс цифрового спектрального анализатора ССРТ обеспечивает наблюдения на ССРТ микроволнового излучения Солнца как в одномерном, так и двумерном режиме.

В четвертой главе приводятся полученные характеристики спектрального

анализатора: центральная частота 5707.5 МГц, рабочая полоса частот 135 МГц,

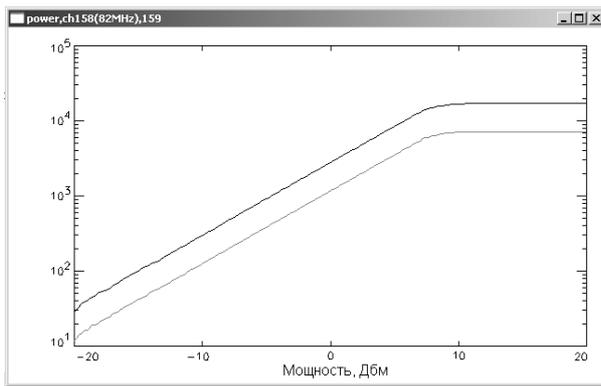


Рис. 4. Амплитудная характеристика цифрового спектрального анализатора. Темная линия соответствует 214-му каналу, светлая – 215 частотному каналу. Линейный участок ~27 дБ.

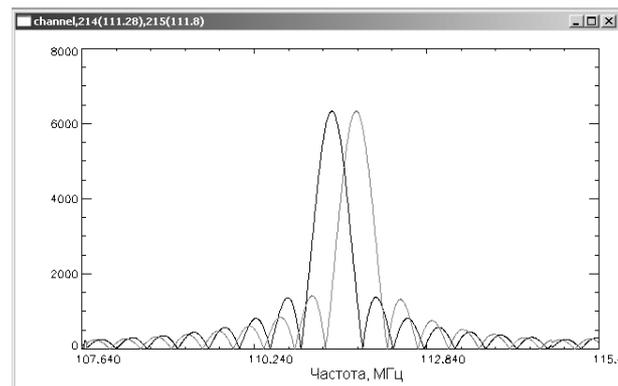


Рис. 5. Характеристики двух соседних частотных каналов анализатора спектра (темная линия – 214-й канал, светлая – 215-й канал). Каналы перекрываются на уровне 0.75, уровень боковых лепестков около 20 %.

эффективное число каналов 2×210 , динамический диапазон ~27дБ. Перекрывание частотных каналов на уровне 0.75, уровень боковых лепестков составляет порядка 20 %, данные характеристики приведены на рис. 4 и 5 без коррекции частотных каналов.

В программе регистрации имеется возможность записи корреляционных данных до получения спектра, что оставляет возможность манипуляции характеристиками частотных каналов путем наложения оконных функций.

При записи исходных корреляционных данных в файл пишется две автокорреляции: суммарного и разностного сигналов ССРТ. Данные пишутся в том виде, в каком они поступают с субкорреляторов. Для получения полного автокорреляционного ряда $C(i)$ для каждого сигнала необходимо перегруппировать поступающие корреляционные данные $C^n(k)$, согласно формуле

$$C(nk) = C^0(k)$$

$$C(nk+1) = C^1(k)$$

$$C(nk+2) = C^2(k)$$

⋮

$$C(nk+n-1) = C^n(k),$$

где $k=0, 1, 2, \dots, \frac{N}{n}-1$, n – количество субпоток, N – число частотных каналов или задержек в корреляторе.

Фурье-преобразование автокорреляционной функции суммарного и разностного сигналов дает одномерные сканы ССРТ, разность которых есть двумерное радиоизображение, получаемое на ССРТ. Запись данных ведется в обоих форматах одновременно.

Проектный режим работы ССРТ — регистрация корреляционного сигнала для построения двумерных изображений Солнца за счет вращения Земли. При регистрации на АОП составляющие корреляционного сигнала получались путем переключения фазы в волноводе, которое осуществлялось сначала включением полуволнового отрезка в тракт интерферометра СЮ с добавлением аналогичного переключателя в плечо ВЗ для уменьшения паразитной амплитудной модуляции, затем (и в настоящее время) при помощи двойного Т-моста. В разработанном и реализованном методе получение компонент корреляционного сигнала осуществляется в цифровом виде, что полностью позволяет избавиться от паразитной амплитудной модуляции, возникающей из-за разных коэффициентов пропускания плечей тракта.

Цифровой спектральный анализатор рассматривается также с точки зрения анализатора спектра, применительно не только к задачам ССРТ. Прежде всего, путем простой замены IP-ядра можно в широких диапазонах изменять количество каналов и соответственно принимаемую полосу частот. Например, максимальное число каналов анализатора спектра мощности в полосе частот до 50 МГц составит более 1200 каналов. В то же время для полосы частот в 250 МГц, что является максимумом для данного типа АЦП, можно реализовать до 240 частотных интервалов. Планируется внедрение корреляционного анализатора спектра в качестве приемного устройства радиоспектрографа 2–24 ГГц, разрабатываемого на ССРТ, а также использование наработок в данной области для приема радиоизлучения Солнца в системе e-Callisto – международной сети солнечных радиометров метрового диапазона.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Основные результаты диссертации

Созданы аппаратура и программное обеспечение цифрового спектрального анализатора для регистрации сигналов Сибирского солнечного радиотелескопа, позволяющие проводить регулярные наблюдения солнечной активности в диапазоне 5640–5775 МГц в одномерном и двумерном режимах.

Разработана и реализована методика демультимплексирования входных данных во временной области, позволяющая обрабатывать требуемую полосу частот на скорости в несколько раз меньшей, чем требуется по критерию Найквиста.

С помощью созданного цифрового спектрального анализатора проведен ряд физических экспериментов по наблюдению микроволнового излучения Солнца с июня 2011 г. Обеспечено регулярное получение двумерных радиоизображений Солнца и корреляционных данных с помощью созданного цифрового спектрального анализатора.

С помощью полученных экспериментальных данных показано, что использование цифрового спектрального анализатора для регистрации сигналов ССРТ позволяет избавиться радиоизображения Солнца от эффектов паразитной амплитудной модуляции.

Разработанные новые аппаратура и программное обеспечение используется в наблюдениях на Сибирском солнечном радиотелескопе, что подтверждено актом внедрения ИСЗФ СО РАН.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. С.В. Лесовому за консультации, методическую помощь, конструктивное руководство и ценные замечания. Признательность за поддержку и понимание заместителю директора по научной работе д.ф.-м.н., профессору А.Т. Алтынцеву. Особая благодарность за помощь и консультации д.ф.-м.н. А.И. Агарышеву и к.ф.-м.н. В.Г. Занданову, а также всему коллективу лаборатории мониторинга солнечной активности ИСЗФ СО РАН за помощь и поддержку при выполнении работы.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Алтынцев А.Т., Бармасов В.Д., Губин А.В., Занданов В.Г., Лесовой С.В., Поташников А.К., Попов А.И., Стасюк Р.Ю. Распределенный комплекс управления Сибирского солнечного телескопа // Датчики и системы. 2005. № 6. С. 6–9.

2. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Zandanov V.G., Ivanov E.F., Gubin A.V., Maslov A.I. Ten antenna prototype of a radio heliograph based on the Siberian solar radio telescope // Geomagnetism and Aeronomy. 2009. N 8. P. 1125–1127. doi:10.1134/S0016793209080167.

3. Губин А.В., Лесовой С.В. Цифровой корреляционный приемник Сибирского солнечного радиотелескопа // Вестник ИрГТУ. 2012. № 1. С. ISSN-1814–3520.

4. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Ivanov E.F., Gubin A.V. The Multifrequency Siberian Radioheliograph., Solar Physics. 2012. doi:10.1007/s11207-012-0008-7.

в других изданиях:

5. Altyntsev A.T., Barmasov V.D., Gubin A.V., Zandanov V.G., Lesovoi S.V., Potashnikov A.K., Popov A.I. and Stasyuk R.Yu.. Distributed Control System of the Siberian Solar Radio Telescope // Automation, Control and Information Technology. ACA-2005. Novosibirsk, 2005. 483-135.

6. Smolkov G.Y., Lesovoi S.A., Zandanov V.G., Altyntsev A.T., Gubin A.V. The main results and the perspectives in the researches at SSRT // Издания трудов ОНЦКП СО РАН за 2000–2005 гг. 15.11.04 г.

7. Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Занданов В.Г., Иванов Е.Ф., Губин А.В., Маслов А.И. 10 – антенный макет радиогелиографа на базе Сибирского солнечного радиотелескопа // Солнечно-земная физика. 2008. Вып. 12. Т. 1. С. 71–73. УДК 520.27, 520.8.056.

8. Gubin A.V., Stasyuk R.Yu., Lesovoi S.V., Barmasov V.D., Sotnikov A.A. The

Antenna Control System and the Data Acquisition System of the Siberian Solar Radio Telescope // Automation, Control and Information Technology. ACA-2005. Novosibirsk, 2005. 483-055.

9. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Gubin F.V., Ivanov E.F. Imaging with the Siberian Solar Radio Telescope and prospects for a new broad radiotelescope // Ten-Year-Chinese-Russian Cooperative Research on Space Weather, CSSAR, Beijing, China. – 2010. – P. 28 – 35.

10. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Gubin A.V., Ivanov E.F. The new-generation radio heliograph on base of the Siberian Solar Radio Telescope // The X Russian-Chinese Conference on Space Weather: Abstracts.

11. Лесовой С.В., Алтынцев А.Т., Занданов В.Г., Иванов Е.Ф., Губин А.В., Маслов А.И. 10-антенный макет радиогелиографа на базе Сибирского солнечного радиотелескопа // Труды Международного симпозиума «Международный гелиофизический год-2007».

12. Лесовой С.В., Иванов Е.Ф., Алтынцев А.Т., Занданов В.Г., Маслов А.И., Губин А.В. Многоволновый солнечный радиотелескоп // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы: в 8-ми томах. Т. VIII: Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце–Земля. М., 2008. С. 48–51.

13. Лесовой С.В., Занданов В.Г. и др. Создание многоволнового радиогелиографа на базе Сибирского солнечного радиотелескопа // Труды Всерос. конф. «Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности». САО РАН, Нижний Архыз, КЧР. СПб., 2007. С. 614–624.

14. Губин А. В. Фазирование 12-элементной АР // Тез. докл. Всерос. конф. Многоволновые исследования Солнца и современные проблемы солнечной активности. САО РАН, Нижний Архыз, КЧР. СПб., 2006.

15. Smolkov G. Ya., Lesovoi S.V., Zandanov V.G., Altyntsev A.T., Gubin A.V. The Main Results and the Perspectives in the Researches at SSRT // Chin. J. Space Science (Spec. Issue of China-Russia Joint Research on Space Weather). 2005. V. 25, N 5. P. 351–355.

16. Лесовой С.В., Занданов В.Г., Смольков Г.Я., Алтынцев А.Т., Губин А.В. Модернизация Сибирского солнечного радиотелескопа // Труды Всерос. конф. «Экспериментальные и теоретические исследования основ прогнозирования геологогеофизической активности». Троицк, 2005. С. 241–248.
17. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Zandanov V.G., Ivanov E.F., Gubin A.V., Maslov A.I. 12 - Antenna prototype of the Siberian Radioheliograph. Symp. INY2007-NISTP “New Insight into Solar-Terrestrial Physics, Zvenigorod. – 2007, – p. 70.
18. S.V. Lesovoi, V. G. Zandanov, A.T. Altyntsev, A.V. Gubin 12-antenna prototype of the Siberian radio heliograph // Solar Radio Physics and the Flare-CME Relationship: abstracts of the CESRA Workshop, Greece, Ioannina, 2007. – P. 13 – 14.
19. Lesovoi S.V., Altyntsev A.T., Zandanov V.G., Ivanov E.F., Gubin A.V., Maslov A.I. 12-antenna prototype of the Siberian radio heliograph // abstracts. The 8th Chinese-Russian Workshop on Space Weather. China. Beijing, 2007. – P.7.

Отпечатано в издательском отделе
ИСЗФ СО РАН
Заказ № 133 от 25 сентября 2012 г.
Объем 20 с.
Тираж 100экз.