

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт солнечно-земной физики
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЗФ СО РАН)

УДК 520.24; 535.3, 523.94
№ госрегистрации 01201158892
Инв. № 5-12/4.00

УТВЕРЖДАЮ
Директор Института
чл.-корр. РАН

А. П. Потехин
«16» октября 2012 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме

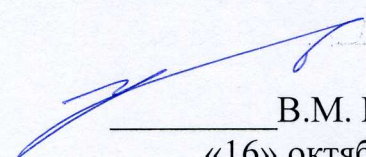
ВЫПОЛНЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ
УСУ «СИБИРСКИЙ СОЛНЕЧНЫЙ РАДИОТЕЛЕСКОП» (ССРТ) И УСУ
«БОЛЬШОЙ СОЛНЕЧНЫЙ ВАКУУМНЫЙ ТЕЛЕСКОП» (БСВТ) В ЦЕЛЯХ
РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗА ВОЗМУЩЕНИЙ СРЕДЫ
В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ
(заключительный, этап № 4)

Шифр - 2011-1.8-518-005

Государственный контракт № 16.518.11.7065

Наименование этапа: «Обобщение результатов исследований явлений солнечной активности. Опытная эксплуатация созданных приборов и установок»

Руководитель работ по проекту
заместитель директора, чл.-корр. РАН

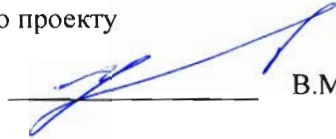

В.М. Григорьев
«16» октября 2012 г.

Иркутск 2012

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работ по проекту

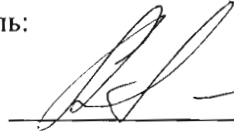
член-корр. РАН



В.М. Григорьев (введение, раздел 1, заключение)

Ответственный исполнитель:

Зав. отделом, д. ф.- м. н.



А. Т. Алтынцев (введение, раздел 4, 5, заключение)

Исполнители:

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



В.И. Скоморовский
(введение, заключение, раздел 1)

Зав. лаб., к.ф.-м.н.



С.В. Лесовой (раздел 4, 5)

В.н.с., д.ф.-м.н.



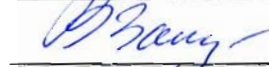
Н.М. Фирстова (раздел 2,5)

С.н.с., к.ф.-м.н.



В.И.Поляков (раздел 2)

С.н.с., к.ф.-м.н.



В.Г. Занданов (раздел 5)

С.н.с., к.ф.-м.н.



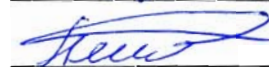
Н.С. Мешалкина (раздел 4)

С.н.с., к.ф.-м.н.



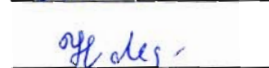
Л.К. Кашапова (раздел 4)

Н.с.



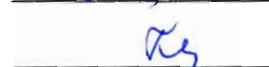
В.С. Пещеров (раздел 3)

Н.с.



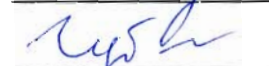
Н.Н. Лесовая (раздел 5)

Н.с.



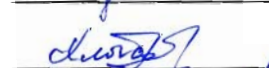
Г.И. Кушталь (раздел 1)

М.н.с.



А.В. Губин (раздел 4)

М.н.с.



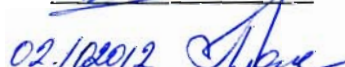
А.И.Хлыстова (раздел 1)

Инж.-технолог 1 к.



В.А.Прошин (раздел 1)

Инж.-программист 1 к.

02.10.2012 

Н.А. Просовецкая (нормоконтроль, раздел 4)

Инженер 2 к.



В.В. Козловская (раздел 1, 2, 3)

М.н.с.



Е.Ф. Иванов (раздел 4)

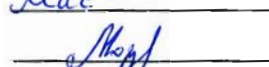
Главный специалист

по автоматике



А.И. Маслов (раздел 5)

Зав. лабораторией, д.ф.м.н.



А.В.Мордвинов (раздел 1)

Реферат

Отчет 90 стр., 49 рисунков, 3 таблицы, 9 источн.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ, КОРОНА, МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ИНТЕРФЕРОМЕТР, АНТЕННА, ТЕЛЕСКОПЫ, ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ, МАГНИТОГРАФ, СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Объектом исследований являются:

- Солнечная активность на основе комплексного мониторинга тонкой структуры и магнитных полей в фотосфере, хромосфере и микроволновых источников в короне Солнца,
- Развитие инструментария для диагностики солнечных явлений: модернизация ССРТ во мноволновый радиогелиограф, создание спектрополяриметров с широким диапазоном принимаемых частот, создание новых технологий измерений распределений радиояркости по диску Солнца.

Во время выполнения контракта в 2011-2012 гг. был выполнен ежедневный, в течение светового дня мониторинг солнечной активности на ряде частот микроволнового излучения. Уникальными являются последовательности радиоизображений диска Солнца на длине волны 5.7 ГГц. Непрерывный ряд данных наблюдений микроволнового излучения Солнца продолжается с 1985 года.

В рамках контракта создан и введен в постоянные наблюдения ряд новых инструментов: 10-антенный интерферометр для наблюдения пространственных характеристик источников микроволнового излучения на нескольких частотах одновременно в диапазоне от 4 до 8 ГГц, цифровой спектрополяриметр на диапазон частот от 2 до 24 ГГц, многоканальный спектрополяриметр с субсекундным временным разрешением на диапазон частот от 4 до 8 ГГц.

Новой разработкой, внедренной на основном инструменте УСУ ССРТ, является цифровой широкополосный коррелятор, реализованный на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Цифровой корреляционный приемник свободен от паразитной амплитудной модуляции, так как изменение фазы происходит после оцифровки сигналов, что позволяет улучшить качество изображений. Кроме того, уменьшены нелинейности позиционирования на радиокартах по сравнению со штатным акусто-оптическим приемником ССРТ. Приемное устройство, основанное на цифровом корреляторе, расширяет возможности УСУ ССРТ, поскольку позволяет одновременно регистрировать двумерные и одномерные распределения радиояркости. Отработка методики демультимплексирования входных данных позволила в разы увеличить полосу

обрабатываемого сигнала и достичь характеристик, необходимых для 96-антенного интерферометра, монтаж систем которого предполагается начать в 2012 году. Для отладки ряда систем, широкополосных антенн и облучателей использовалась тестовая эксплуатация 10-антенного интерферометра.

В рамках выполнения контракта на УСУ БСВТ для исследования тонкой структуры солнечной атмосферы методом многоволновой томографии с помощью монохроматических фильтров выбраны «диагностические» линии и полосы солнечного спектра, которые показывают структуру на различных высотах солнечной атмосферы. Разработана установка для изготовления однородных, стабильных интерференционных фильтров (ИФ) методом ионного распыления с ионным ассистированием. Пространственное распределение плотности ионного потока, найденное в процессе испытания ионного источника распыления, обеспечивает получение пленок, однородных по толщине. Изготовлены ИФ для солнечной томографии на G –область спектра (λ 4305 Å), на область синего континуума (λ 4320 Å) и на область красного континуума (λ 6340Å). Выполненные на БСВТ в соответствии с заданием 4 этапа исследования спектральных и оптико - физических характеристик интерференционных и интерференционно-поляризационных фильтров показали высокий контраст и однородность полосы пропускания фильтров.

В спектрографе БСВТ установлено второе камерное зеркало. Двухкамерный спектрограф обеспечивает исследования с ПЗС-матрицей в широком интервале длин волн от области линии H α , до линии H β . Проведены наблюдения солнечных вспышек и протуберанцев.

На УСУ БСВТ разработан и создан специализированный солнечный телескоп для мониторинга крупномасштабных магнитных полей и полей скорости на Солнце. В состав телескопа входят: питающая оптика, спектрограф, фотометр, анализатор поляризации, системы гидирования и управления. Последняя обеспечивает управление оптико-механическими и электронными узлами телескопа, регистрацию параметров Стокса солнечного излучения, квазиреальную обработку, визуализацию данных и контроль процесса измерений наблюдателем в диалоговом режиме. На завершающем этапе процесса создания солнечного телескопа проведены наблюдения крупномасштабных магнитных полей Солнца на уровне фотосферы с 22 июня по 2 октября 2012 года по специально разработанной методике измерений КМП с использованием систем управления, сбора и обработки данных. Получены магнитограммы продольной составляющей полного вектора напряженности магнитного поля полного диска Солнца. На основе этих измерений оценены реальные функциональные возможности телескопа в целом, возможности его основных систем, а также качество и оперативность получаемых данных.

Продолжение существовавших и введение новых видов наблюдений нашло отражение в

расширении круга пользователей в России и зарубежных обсерваториях. Каталоги наблюдений размещены на сайтах [http:// iszf.irk.ru/](http://iszf.irk.ru/) и <http://badary.iszf.irk.ru/>. Значительная часть данных доступна в удаленном доступе. Информация о микроволновом излучении Солнца отображается на сайте <http://badary.iszf.irk.ru/> в режиме online.

С целью эффективного использования данных УСУ ССРТ развиты методы измерения различных характеристик микроволновых источников, появляющихся в процессе солнечных вспышек, измерений анизотропии нетепловых электронов во вспышечных петлях по данным многоволновых микроволновых наблюдений. Уникальные данные получены при исследовании источников с быстрым частотным дрейфом, откликов на появление пучков нетепловых электронов, позволившие впервые разделить эффекты временной динамики и пространственной неоднородности среды излучения.

Данные УСУ были использованы в публикациях и докладах в 2011-2012 гг. Получен ряд важных результатов об источниках субсекундных всплесков, структуре переходного слоя от хромосферы к короне.

Содержание

Введение	8
1 Проведение испытаний в натуральных условиях монохроматических фильтров для томографии	12
1.1 Интерференционные фильтры для наблюдений в G -полосе и синем континууме ..	12
1.2 Интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) для наблюдений в линии Na и интерференционный фильтр в красном континууме	15
1.3 Интерференционно –поляризационный фильтр для наблюдений в K Ca II.....	18
2 Испытание макета и исследование Солнца на двухкамерном спектрографе.....	20
3 Испытания и опытные наблюдения на солнечном телескопе для измерения крупномасштабных магнитных полей.....	26
3.1 Общие сведения и принцип работы инструмента.....	26
3.2 Процесс наблюдения	28
3.3 Содержание файлов данных и магнитограмм	32
3.4 Первая магнитограмма	34
4 Введение 10-антенного интерферометра в режим регулярных наблюдений	37
4.1 Испытания программно-аппаратных частей приемной системы 10-антенного интерферометра.....	37
4.2 Калибровка и диагностика 10-антенного интерферометра.....	41
4.3 Форматы выходных данных 10-антенного интерферометра	42
4.4 Расписание и настройки программы сбора данных 10-антенного интерферометра	42

4.5 Публикация данных в сети Интернет.....	47
5 Исследование крупномасштабных магнитных полей, структуры солнечной хромосферы, параметров плазмы в солнечной короне. Обобщение и оценка полученных результатов	49
5.1 Итоги НИР за 1-3 этапы	49
5.1.1 Результаты выполнения НИР УСУ БСВТ.....	49
5.1.2 Результаты выполнения НИР УСУ ССРТ.....	63
5.2 Обнаружение ударной поляризации линии H α во вспышках.....	79
5.3 Параметры корональной плазмы спокойного Солнца по данным микроволнового излучения.....	80
6 Закупка оборудования	85
Заключение	87
Список использованных источников.....	90

Введение

Выполнение НИР направлено на получение новых знаний и результатов в области прогнозирования состояния околоземной среды, физических и химических процессов в ней, рационального природопользования, изучения космических объектов, оценки техногенных и природных рисков. Исследования пространственно - временной структуры, магнитных полей и спектра излучения динамических явлений на Солнце необходимы для решения фундаментальных проблем природы солнечных вспышек и корональных выбросов, развития научных основ прогнозирования их геоэффективности.

Мероприятия по развитию направления исследований на УСУ БСВТ при выполнении НИР соответствовали основам концепции развития УСУ на 2011-2012 годы. Они включали использование уникального оборудования и разработку нового оборудования, программу наблюдений солнечной активности. Выполнен анализ научно-технической литературы, обоснованы методы многоволновых спектральных и томографических наблюдений.

Создан двухкамерный спектрограф на БСВТ: разработана оптическая схема, рассчитан, сконструирован и изготовлен двухкамерный спектрограф БСВТ. Проведены экспериментальных наблюдения с одновременным получением различных пар спектральных областей с использованием второго камерного зеркала, проведен цикл наблюдений солнечных вспышек. Введение второго камерного зеркала позволило одновременно наблюдать две области спектра, что существенно увеличило возможности спектрографа, сохранив его прежнее достоинство: высокое спектральное разрешение и пространственное разрешение.

Были проведены пробные наблюдения, при которых на второе камерное зеркало ставились разные области спектра, а именно: водородная линия $H\beta$, линии b_1 MgI и D_3 NaI. С использованием второго камерного зеркала в течение летнего наблюдательного сезона 2012 года проводились спектрополяриметрические наблюдения солнечных вспышек одновременно в водородной линии $H\alpha$ и магниточувствительной линии железа FeI 6302Å.

- Для многоволновой томографии тонкой структуры солнечной атмосферы на УСУ БСВТ выбраны «диагностические» линии и полосы солнечного спектра, которые показывают структуру на различных высотах солнечной атмосферы. Двумерные изображения солнечных образований будут получаться с помощью новых узкополосных интерференционных фильтров (ИФ) в этих линиях. Разработана принципиальная схема и макет установки для изготовления однородных, стабильных ИФ методом ионного распыления с ионным ассистированием. По результатам

испытаний макета разработана документация на установку для изготовления монохроматических фильтров и создана установка для нанесения многослойных оптических покрытий методом ионного напыления с ионным ассистированием и нейтрализатором зарядов. Изготовлены оптические интерференционные фильтры для солнечной томографии на G – область спектра (λ 4305 Å) на области синего континуума (λ 4320 Å) и на область красного континуума (λ 6340Å). Проведено исследование оптико-физических характеристик монохроматических фильтров в натуральных условиях на спектрографе БСВТ. Получены спектральные кривые пропускания и однородности изготовленных узкополосных фильтров, Ширина полосы пропускания фильтров менее 1 нм, однородность положения максимума полосы пропускания в пределах 0.1 нм. Изготовленные узкополосные интерференционные монохроматические фильтры устойчивы к влажной атмосфере и имеют стабильные характеристики для работы на телескопе в натуральных условиях

На УСУ БСВТ разработан и создан специализированный солнечный телескоп для мониторинга крупномасштабных магнитных полей и полей скорости на Солнце. В состав телескопа входят: питающая оптика, спектрограф, фотометр, анализатор поляризации, системы гидирования и управления. Последняя обеспечивает управление оптико-механическими и электронными узлами телескопа, регистрацию параметров Стокса солнечного излучения, квазиреальную обработку, визуализацию данных и контроль процесса измерений наблюдателем в диалоговом режиме. На завершающем этапе процесса создания солнечного телескопа проведены наблюдения крупномасштабных магнитных полей(КМП) Солнца на уровне фотосферы с 22 июня по 2 октября 2012 года по специально разработанной методике измерений КМП с использованием систем управления, сбора и обработки данных. Получены магнитограммы продольной составляющей полного вектора напряженности магнитного поля полного диска Солнца. На основе этих измерений оценены реальные функциональные возможности телескопа в целом, возможности его основных систем, а также качество и оперативность получаемых данных.

Целью контракта является продолжение комплексного мониторинга солнечной активности в радио и оптическом диапазонах, а также развитие инструментария по диагностике солнечных явлений. Последнее направление работ предусматривает на УСУ ССРТ: создание новых технологий измерений интегрального потока и распределений радиояркости по диску Солнца в широком диапазоне радиочастот с высоким временным и спектральным разрешением. Особое значение имеют работы по созданию крупного многоволнового радиогелиографа, основные системы которого тестировались в отчетном периоде во время регулярных наблюдений на 10-

антенном прототипе.

Введение 10-антенного интерферометра в режим регулярных наблюдений являлось основной задачей последнего, четвертого этапа Контракта. В разделе 4 отчета приведены результаты испытаний программно-аппаратных систем приемной системы, методики их калибровки и диагностики. Также описаны расписание и настройки программы сбора данных, форматы их представления в сети ИНТЕРНЕТ.

Для обеспечения работ по научным Программам Президиума РАН, СО РАН, ОФН РАН, РФФИ на УСУ ССРТ были продолжены многолетние (с 1985 года) ряды ежедневных наблюдений микроволнового излучения Солнца на частоте 5.7 ГГц. Для радиотелескопа был создан цифровой корреляционный приемник, позволяющий качественно улучшить характеристики получаемых изображений подавлением амплитудно-фазовых искажений. Кроме того, во время выполнения Контракта на комплексе УСУ ССРТ стали проводиться регулярные наблюдения на новых спектрографах интегрального потока, созданных на современной элементной базе.

Необходимым элементом развития инструментария для наблюдений динамических процессов на Солнце является развитие методов анализа данных, особенно многоволновых. При выполнении контракта были разработаны новые и усовершенствованы существующие методы анализа микроволнового и жесткого рентгеновского излучения из вспышечных корональных магнитных петель. Было показано, что изучение многоволновых наблюдений с высоким временным и пространственным разрешением позволяет определить вклад во вспышечный нагрев диссипации обратного тока, оценить сходимость магнитных силовых линий трубки при переходе от короны к хромосфере. Следует отметить новые фундаментальные результаты о потоках нетепловых электронов во вспышечных петлях, полученные при анализе наблюдений на ССРТ последовательностей субсекундных дрейфующих всплесков III типа.

Для решения задач мониторинга солнечной активности в интересах кооперативных фундаментальных исследований и при выполнении заданий заинтересованных ведомств необходимо обеспечить оперативную обработку и анализ данных наблюдений, поскольку время прихода возмущений на околоземные орбиты составляет от десятка минут до двух-трех суток. Кроме того, современные тенденции в организации научных исследований заключаются в развитии так называемых виртуальных обсерваторий. В виртуальной обсерватории должны быть доступны управление режимами наблюдений, получение данных и использование программного обеспечения для их анализа в любом месте с достаточно хорошей Интернет связью. Обсерватории, обладающие уникальными инструментами, должны в максимальной степени автоматизировать как

проведение наблюдений, так и процедуры калибровки получаемых данных. Отметим, что автоматизация наблюдений и калибровок способствует также обеспечению качества и однородности данных.

Поэтому одной из задач проекта являлась разработка программного обеспечения, позволяющего представлять данные наблюдений в сети Интернет в реальном времени. Так, по мере накопления данных 10-антенного макета радиогелиографа они записываются в общепринятом формате FITS в файлах, которые доступны по адресу http://badary.iszf.irk.ru/prototype_10.php. Поскольку солнечная активность в течение отчетного периода росла, то удалось зарегистрировать ряд эруптивных событий, включая мощные вспышки и выбросы корональной массы. На пути реализации строящегося в комплексе УСУ ССРТ 96-антенного многоволнового радиогелиографа, прототипом которого является 10-антенный интерферометр, были проведены испытания поляризационных характеристик широкополосных облучателей и коррелятора. Определены направления развития УСУ ССРТ на ближайшие несколько лет, позволяющие существенно улучшить качество калибровки интерферометра.

1 Проведение испытаний в натуральных условиях монохроматических фильтров для томографии

Подготовлен комплекс узкополосных монохроматических фильтров, обеспечивающих получение изображений фотосферы и хромосферы на разных высотах атмосферы Солнца.

Томография солнечной атмосферы должна выполняться на УСУ БСВТ с монохроматическими интерференционными (ИФ) и интерференционно-поляризационными (ИПФ) фильтрами со следующими техническими и функциональными характеристиками полос пропускания:

Таблица 1.1 – характеристики полос пропускания монохроматических фильтров

Назначение	Длина волны, Å	Полуширина, Å	Тип	Смещение полосы
Синий континуум	4320	6	ИФ	фиксированная
Красный континуум	6540	2.5	ИФ	Смещение 6563-6535 Å
полоса	4305	10	ИФ	фиксированная
H CaII	3968	1.35	ИФ	от центра в синее крыло
H-альфа	6563	0.5	ИПФ	смещение по линии

Фильтры установлены на БСВТ и на солнечном спектрографе проведены испытания фильтров и исследование их оптико-физических характеристик в натуральных условиях.

1.1 Интерференционные фильтры для наблюдений в G -полосе и синем континууме

Причины для выбора диагностических каналов для солнечной томографии.

G-полоса: это темная структура в спектре, названная Фраунгофером G -полосой, заполнена СН- линиями. Она усиливается в магнитных элементах (трубках). Это делает возможным находить и отслеживать небольшие межгранульные магнитные элементы. Изображения в **континууме** в синей области, близком к минимуму непрозрачности в $\lambda = 4000 \text{ Å}$, показывают структуру трубок

глубже. Изображения в континууме вместе с G-изображениями дают возможность наблюдать грануляцию и магнитные яркие точки.

Узкополосный интерференционный фильтр представляет собой многослойное покрытие, нанесенное в вакууме на стеклянную подложку. Для получения узкой полосы с высоким контрастом на одну стеклянную подложку наносится двойной фильтр с двумя разделительными промежутками и согласующим слоем. Общее количество интерференционных слоев около тридцати. Для получения стабильных во времени характеристик фильтров многослойные покрытия герметизируются вторым защитным стеклом. Герметизация производится в вакууме холодной сваркой стекол на индии. Для уменьшения рассеянного света и увеличения пропускания на три свободные поверхности фильтра наносится просветляющее покрытие.

Для расширения свободного спектрального интервала узкополосного фильтра и для обеспечения регистрации изображений с ПЗС приемниками без помех узкополосный фильтр используется вместе в комплекте с отрезающим фильтром. Устройство и герметизация отрезающего ИФ такие же, как и узкополосного фильтра.

Технические характеристики G- фильтра

Фильтр контрастный двойной - с двумя разделительными промежутками и согласующим покрытием

Длина волны	4304 Å ,	фиксированная
Рабочая температура	~	30°C
Полуширина полосы	10 Å	
Пропускание в максимуме	39 %	
Пропускание на ширине $\pm 10\text{Å}$	4.5 %	
Световой диаметр	46 мм	

Спектральная кривая пропускания приведена на рисунке 1.1.

Технические характеристики отрезающего фильтра для G- фильтра

Спектральная область отрезания:

- синяя область	дальний ультрафиолет
- красная область	до 1.4 мкм,
Оптическая плотность $\lambda 5800\text{Å} - \lambda 14000\text{Å}$	D= 6.00
Световой диаметр	46 мм

Спектральная кривая пропускания приведена на рисунке 1.2.

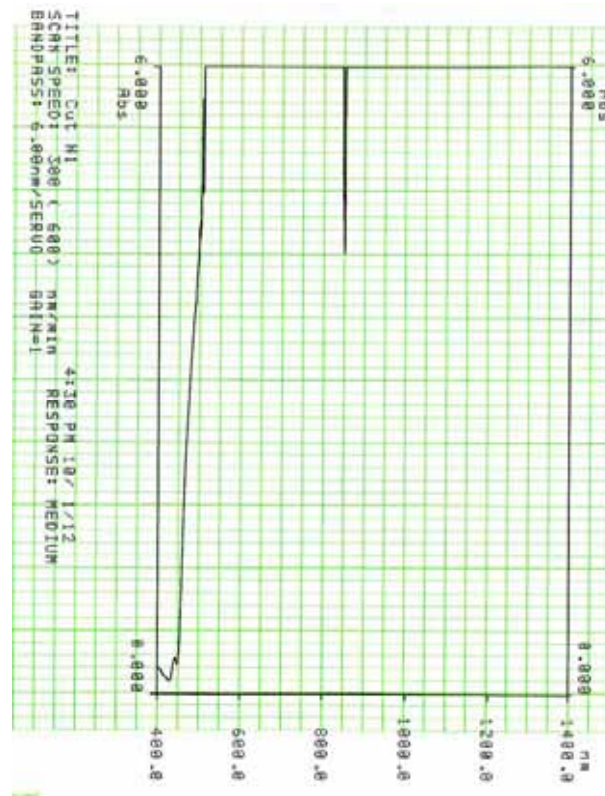
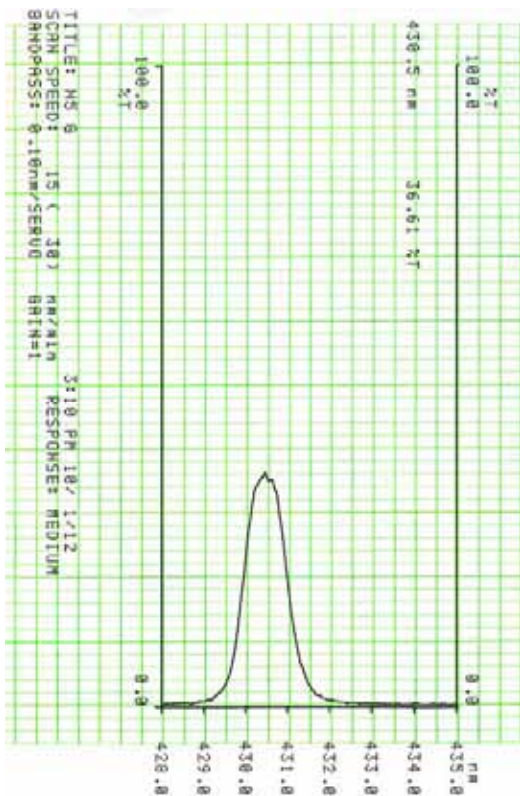


Рисунок 1.1 – Контур пропускания G-фильтра. Рисунок 1.2. – Контур пропускания отсегающего ИФ.

Технические характеристики фильтра на континуум

Фильтр контрастный двойной -с двумя разделительными промежутками и согласующим покрытием

Длина волны	4319 Å,	фиксированная
Рабочая температура	~	30°C
Полуширина полосы	10 Å	
Пропускание в максимуме	49 %	
Пропускание на ширине ± 10 Å	4.5 %	
Световой диаметр	46 мм	

Спектральная кривая пропускания приведена на рисунке 1.3.

Технические характеристики отсегающего фильтра для континуума

Спектральная область отсегаания:

- синяя область – дальний ультрафиолет
- красная область до 1.4 мкм,
- оптическая плотность в области λ5800Å- λ14000 Å D= 6.00

Спектральная кривая пропускания приведена на рисунке 1.4.

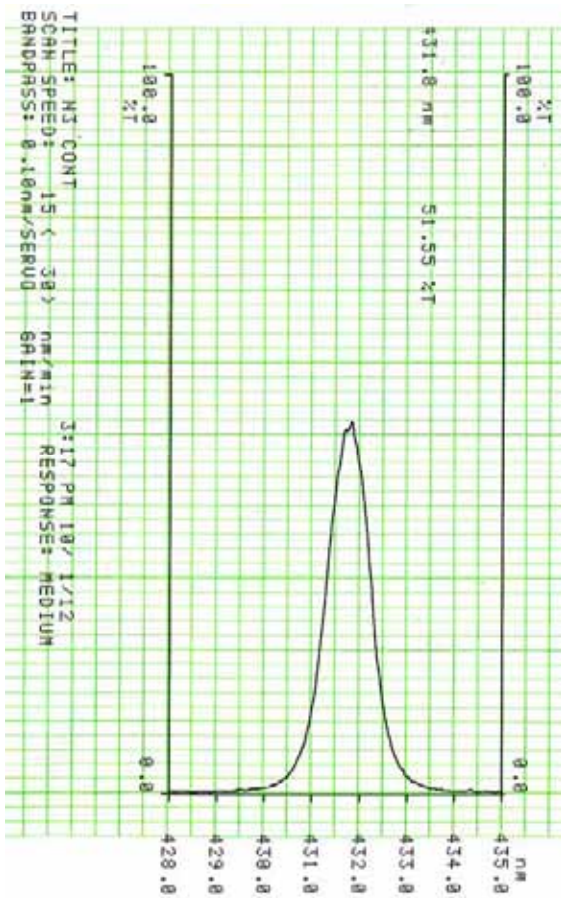


Рисунок 1.3. Контур пропускания фильтра на синий континуум.

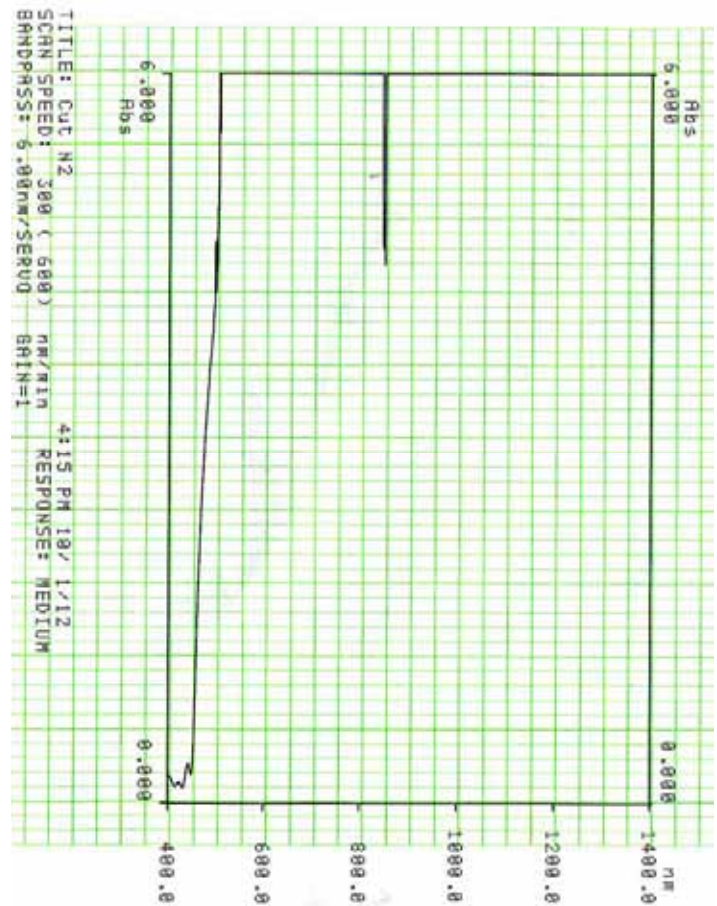


Рисунок 1.4. Контур пропускания отсекающего ИФ для фильтра на синий континуум.

Все оптические поверхности стеклянных подложек фильтров оптически отполированы с высокой точностью и подложки не имеют клина. Искажения волнового фронта пучка света, пропущенного фильтром, находятся в пределах 0.25λ .

1.2 Интерференционно-поляризационный фильтр (ИПФ) для наблюдений в линии $H\alpha$ и интерференционный фильтр в красном континууме

А) $H\alpha$ -структуры могут простираться на любые высоты. Но обычно они лежат от одной до нескольких тысяч километров выше фотосферы.

В оптической стопе $H\alpha$ фильтра проведена юстировка кристаллических пластин из исландского шпата, заменен предварительный ИФ с установкой вместе с ним теплофильтра и отсекающего фильтра для работы с ПЗС-камерой. Оптическая стопа собрана на иммерсии DOW

CORNING 705, $n_d = 1.578$. Рабочая температура фильтра, которую должен показывать ртутный термометр на ИПФ, - 41.05°C , она же совпадает с температурой заданной и с показаниями цифровой шкалы температуры терморегулятора. На рисунке 1.5 приведены кривые спектрального пропускания фильтра, полученные на спектрографе БСВТ, при различных положениях полосы относительно линии Н-альфа водородной лампы. Масштаб по оси X: в одном пикселе 0.01\AA .

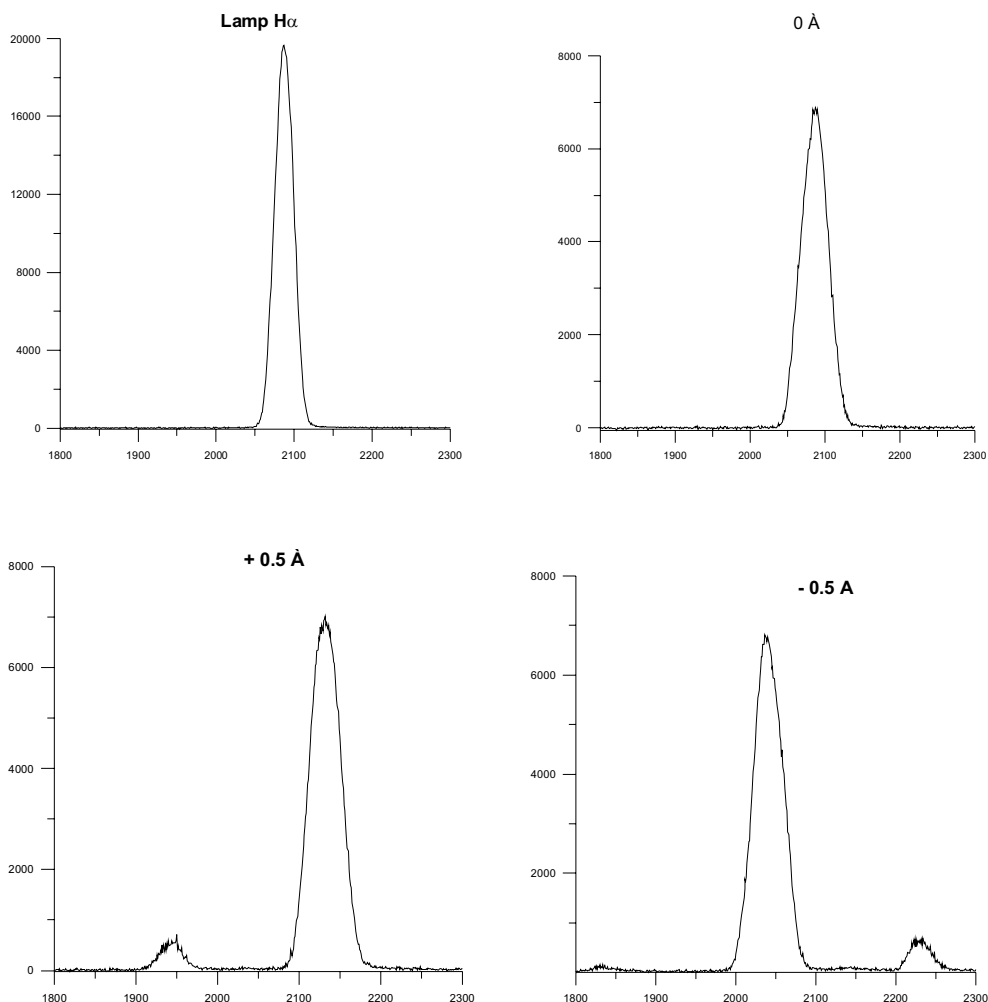


Рисунок 1.5 – Контур линии лампы Н α и контур полосы пропускания ИПФ при ее положениях 0\AA , $\pm 0.5\text{\AA}$ относительно линии лампы.

Регулировка положения полосы ИПФ пропускания осуществляется вращением входного и выходного поляризатора. Вклад «духов» при положении полосы $\pm 0.5\text{\AA}$ не более 10%. Поле зрения ИПФ 2.5° .

Б) Красный континуум $\lambda 6540\text{\AA}$ интересен как пример низкой фотосферы. Соответствующий монохроматор представляет собой ИФ с управляемой полосой за счет наклона фильтра. Им можно пользоваться как регистратором протяженного поглощения в крыле линии Н-алфа на диске при больших доплеровских скоростях или для вне лимбовых структур, например протуберанцев. К

интерференционному фильтру предъявляются требования высокой спектральной однородности по всему полю зрения диаметром 46 мм. Для измерения однородности была собрана схема в соответствии с рисунком 1.6 для проверки фильтров большого диаметра с помощью спектрографа с высотой входной щели в пределах 20мм.

ИФ освещается объективом от точечного источника D почти параллельным пучком со сходимением лучей около одного градуса. Изображение точки строится за щелью спектрографа объективом O_2 , а на щели получается сечение пучка. Диаметр сечения меньше, чем диаметр ИФ, но пучок несет информацию о спектральном пропускании каждой точки фильтра вдоль одного из диаметров. Матрица 512x512, установленная в фокальной плоскости спектрографа регистрирует спектральное изображение входной щели и дает картинку полосы ИФ вдоль его диаметрального разреза.

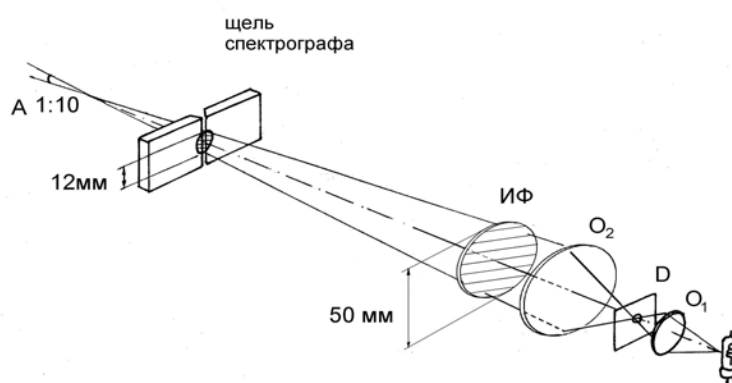


Рисунок 1.6 – Контроль однородности полосы пропускания по полю зрения ИФ на спектрографе.

Если входная щель спектрографа через полупрозрачную пластинку одновременно освещается спектральной лампой с эмиссионной линией $H\alpha$ (на рисунке 1.6 это не показано), то на изображение полосы пропускания ИФ накладывается изображение эмиссионной линии. На рисунке 1.7 слева показаны 4 спектра полосы пропускания ИФ, соответствующие направлениям вдоль 4-х диаметров фильтра по азимутам 0, 45, 90, 135°.

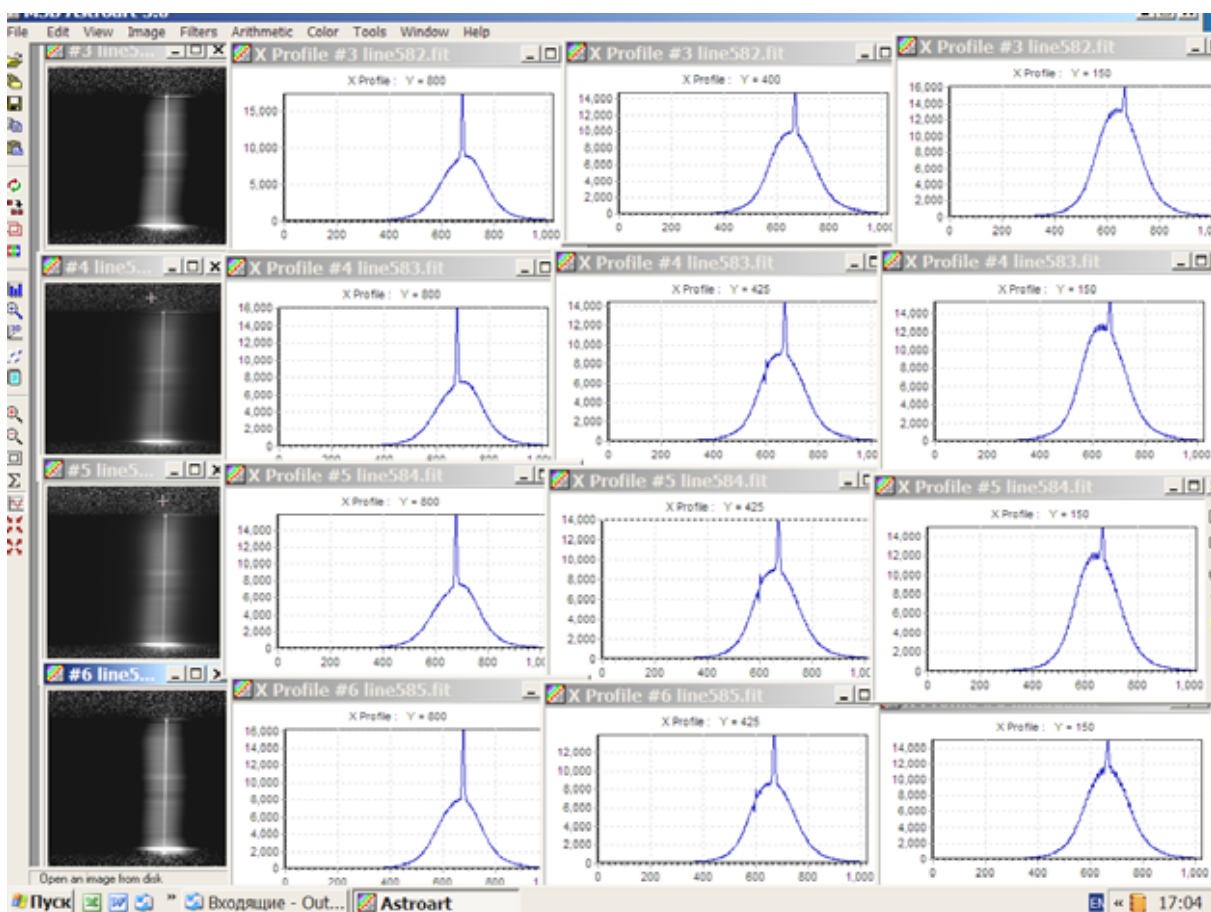


Рисунок 1.7 – Однородность положения полосы пропускания ИФ (красный континуум) по полю зрения. Масштаб вдоль оси X: $0.03\text{Å}/\text{пиксел}$.

На каждое спектральное изображение полосы пропускания ИФ наложено изображение эмиссионной линии водородной лампы. В одном ряду со спектром полосы ИФ (с наложенной H α -эмиссией) приведены три фотометрические сечения спектра: на расстоянии 5 мм от верхнего края фильтра, в центре и на расстоянии 5 мм от нижнего края фильтра. Однородность положения полосы высокая: полуширина полосы пропускания ИФ составляет 6.1Å , а неоднородность полосы в пределах $0,3\text{Å}$, т.е. менее 5%.

1.3 Интерференционно – поляризационный фильтр для наблюдений в K Ca II

Изготовлен новый предварительный узкополосный фильтр для ИПФ. К нему добавлен один отсекающий теплофильтр, чтобы можно было работать с ПЗС-матрицей. Параметры предварительного ИФ: $\lambda_{\text{макс}} = 3936\text{Å}$, пропускание в максимуме 25 %, ширина полосы на уровне 0.5 – 49Å , ширина полосы на уровне 0.1 – 97Å . Теплофильтр отсекает ИК область. Вся оптическая стопа собрана на иммерсии DOW CORNING 710, $n_d = 1.536$.

Полоса пропускания ИПФ центрировалась по солнечному спектру. Полоса показана на рисунке 1.8.

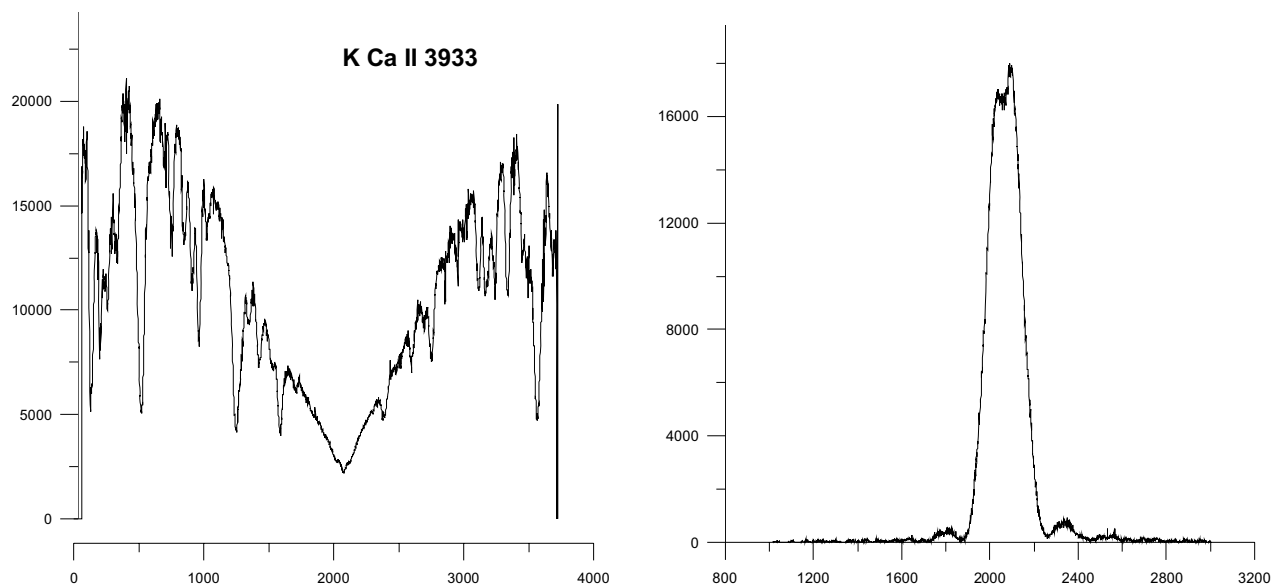


Рисунок 1.8 – Спектр Солнца в области линии кальция (слева) и полоса пропускания ИПФ (справа). Масштаб вдоль оси X: $0.06\text{Å}/\text{пиксел}$.

Ширина полосы пропускания 1.2 Å . Рабочая температура фильтра - 43.5°C . Полоса пропускания по спектру от центра линии в синюю и красную сторону пределах 1 Å смещается вращением входного и выходного поляризатора ИПФ.

2 Испытание макета и исследование Солнца на двухкамерном спектрографе

Летом 2012 года на БСВТ было установлено второе камерное зеркало. В настоящей схеме первое зеркало стоит неподвижно, а второе может передвигаться по рельсам в зависимости от выбора спектральной области, обусловленной задачей наблюдения. Фокусное расстояние для обоих камерных зеркал равно 14 м, а фокусное расстояние коллиматора 9.5 м. В старом варианте схемы, где использовалось одно камерное зеркало, фокусное расстояние коллиматора было 14 м, а первого камерного зеркала – 9.5 м.

При перемещении по рельсам второго камерного зеркала угол пучка на втором камерном зеркале α_3 очень мал и приблизительно равен α_2 (углу пучка на первом камерном зеркале). При таких углах аберрации практически не возникают. Кроме того, при разработке спектрографа было показано, что величина аберрационного кружка зависит от аберраций децентрировки, которые появляются на расстоянии $l \approx 90$ мм от центра регистрируемой спектральной области. Однако при работе с матрицей Fligrab расстояние от центра рабочего кадра составляет $l = 20$ мм, таким образом, регистрация спектров происходит в участке, наименее подверженном аберрациям.

Процесс выставления зеркал перед наблюдениями конкретного сочетания двух спектральных областей должен происходить следующим образом. Вначале с помощью решетки выставляется на первом камерном зеркале одна область спектра. Затем, уже не трогая решетку, на втором зеркале выставляется вторая область спектра путем перемещения по рельсам и поворота этого зеркала вокруг оси. В процессе этих действий область спектра перемещается, что можно наблюдать визуально в кассетной части. Второе камерное зеркало считается установленным, когда в кассетной части появляется нужная область спектра.

Наибольшая сложность при работе с двумя камерными зеркалами состоит в подборе стеклянных фильтров, которые ставятся сразу за щелью спектрографа. Подбор этих фильтров должен одновременно удовлетворять, например, красной области H α и голубой H β . При этом важно, чтобы они не только отсекали ненужные порядки спектра, но желательно, чтобы освещенность, идущая от двух зеркал, была приблизительно одинаковой. Стремление к этому приводит к уменьшению интенсивности более яркого спектра, что в свою очередь ведет к увеличению экспозиции и ухудшению качества спектра. В связи с этим было проведено несколько вариантов сочетания двух спектров с использованием второго зеркала. Были проведены наблюдения: на первом зеркале водородная линия H α , а на втором H β и наоборот; на первом зеркале линия H α , а на втором линии Mg I; на первом зеркале линия H α , а на втором линии натрия

D_3NaI ; на первом зеркале линия $H\alpha$, а на втором магниточувствительная линии железа $FeI\ 6302\text{\AA}$.

На рисунке 2.1 представлены спектрограммы протуберанца, зарегистрированного в линии $H\alpha$ во II левом порядке на втором зеркале и в линии $H\beta$ в III левом порядке на первом зеркале. Наличие четырех спектров объясняется тем, что на БСВТ мы проводим спектрополяриметрические наблюдения. С этой целью за щелью спектрографа постоянно установлен ромбоэдр, расщепляющий падающий луч на два: обыкновенный и необыкновенный лучи.

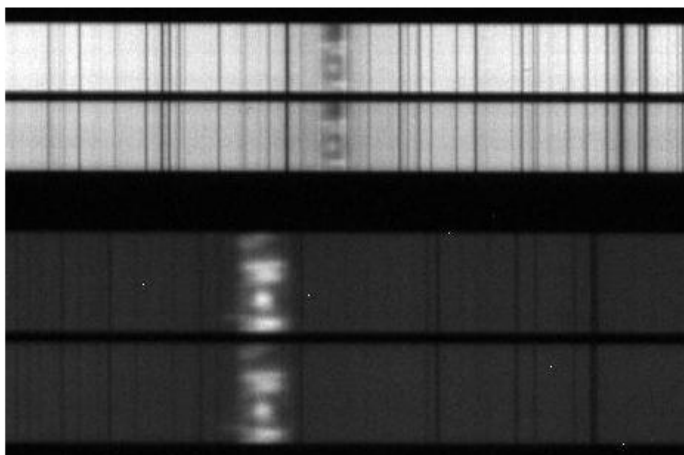


Рисунок 2.1 – Спектрограммы протуберанца, зарегистрированного в линии $H\alpha$ во II левом и в линии $H\beta$ в III левом порядке.

В соответствии с рисунком 2.1, спектры отличаются как интенсивностью, так и размером. Различие в высоте спектров объясняется тем, что этот снимок был получен при использовании старой схемы спектрографа, когда фокус камерного зеркала составлял 9.5м, а фокус второго камерного зеркала равен 14м. Что касается различия интенсивности между областями $H\alpha$ и $H\beta$, то для этого варианта мы не сумели подобрать лучшего сочетания светофильтров.

В настоящее время на БСВТ проводятся спектрополяриметрические наблюдения солнечных вспышек. Естественно, было бы желательно одновременно наблюдать водородные линии $H\alpha$ и $H\beta$, чтобы видеть вспышечные процессы на двух хромосферных уровнях. С другой стороны, не менее интересно знать состояние магнитного поля в фотосфере, где развивается хромосферная вспышка, поскольку вспышки возникают в активных областях с локально усиленным магнитным полем. Поэтому более реалистичным нам показалось проводить спектральные наблюдения солнечной активности в области $H\alpha$ и в области магниточувствительной линии $FeI\ 6302\text{\AA}$. Это, конечно, не исключает другие сочетания линий при использовании второго камерного зеркала.

На следующих рисунках показано несколько примеров спектрограмм, полученных с двумя

камерными зеркалами одновременно в области $H\alpha$ и линии $FeI\ 6302\text{\AA}$. На рисунке 2.2 представлены спектрограммы спокойной области. На рисунках 2.3 и 2.4 в области хромосферы видны «усы»- тонкоструктурные образования в активной области, в то время как в линии железа наблюдается расщепление, по-видимому, в полутени солнечного пятна.

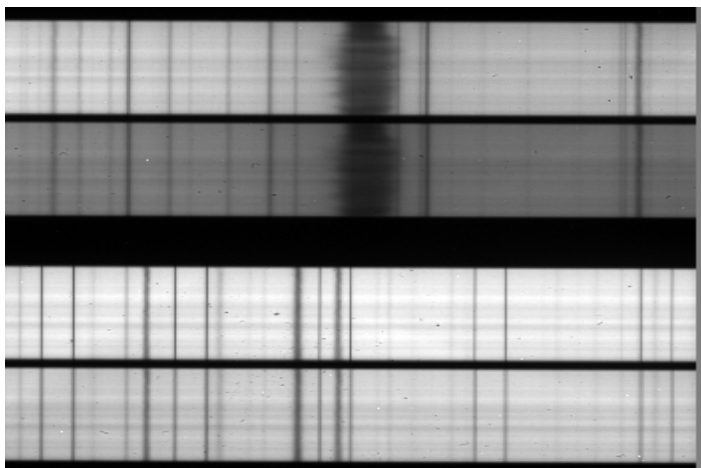


Рисунок 2.2 – Спокойная область.

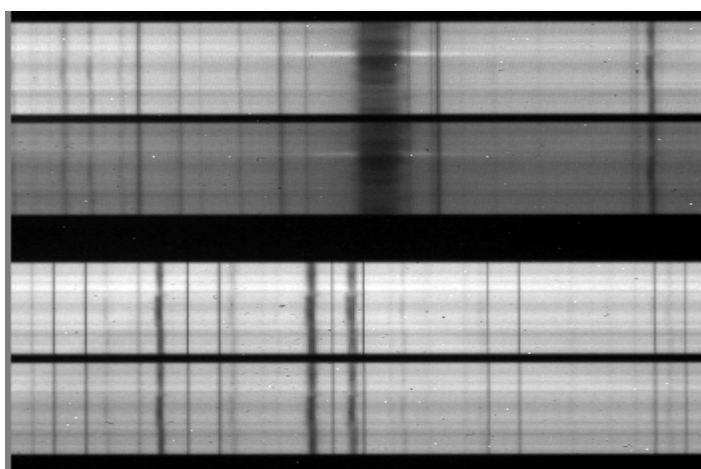


Рисунок 2.3 – «Усы».

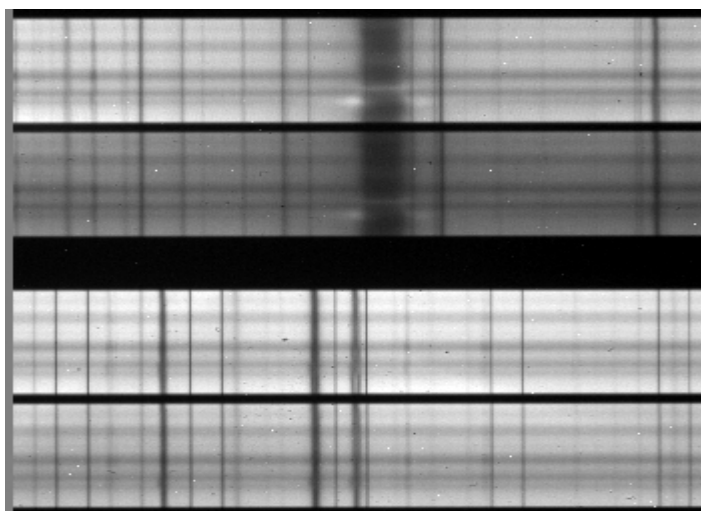


Рисунок 2.4 – «Усы» и расщепление линии FeI 6302Å.

На следующих кадрах (рисунки 2.5 и 2.6) хорошо видно расщепление магниточувствительной линии в пятне и полутени.

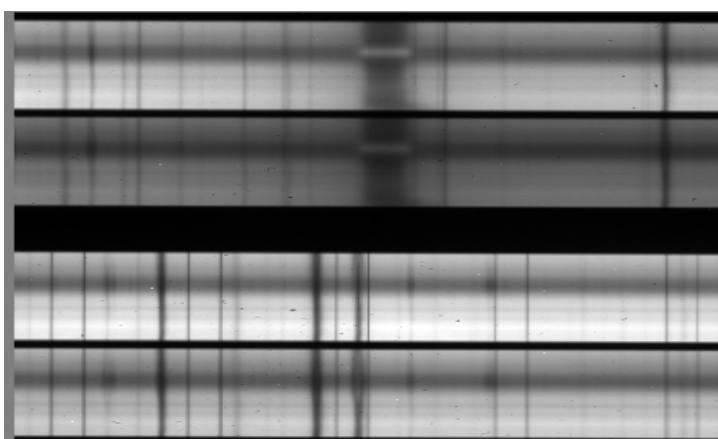


Рисунок 2.5 – Эмиссия в пятне в линии Hα и расщепление линии FeI 6302Å.

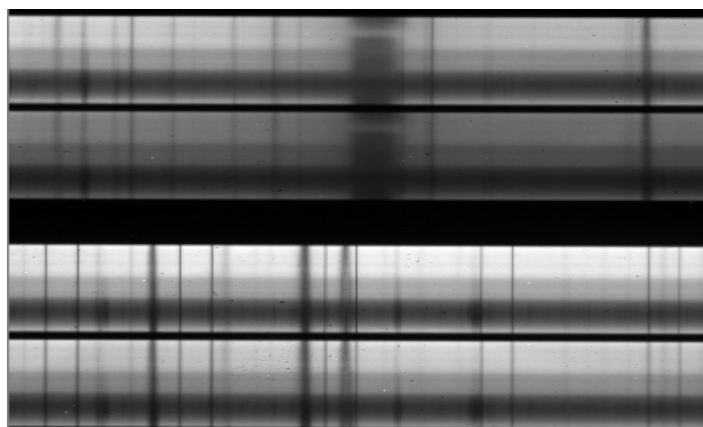


Рисунок 2.6 – Расщепление линии FeI 6302Å в большом пятне и полутени.

На рисунке 2.7 показана спектрограмма слабой вспышки.

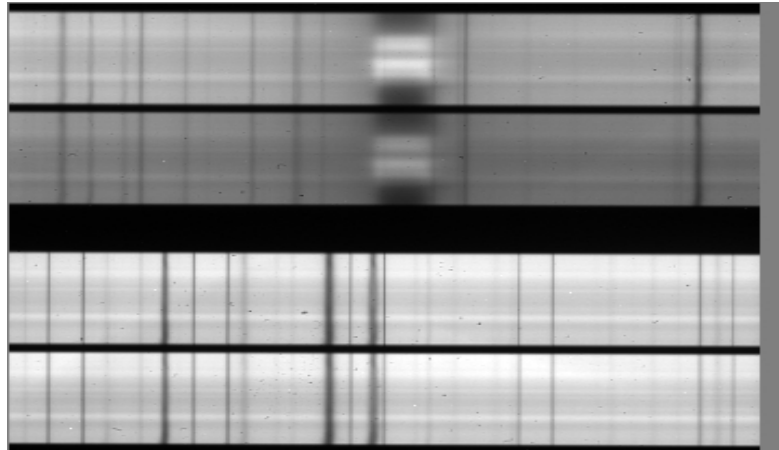


Рисунок 2.7 – Спектрограмма слабой вспышки.

Нам удалось зарегистрировать (к сожалению, не с самого начала) лимбовую вспышку. С точки зрения изучения роли ускоренных частиц в возникновении хромосферной вспышки, которые, в свою очередь вызывают ударную поляризацию, наблюдения лимбовых вспышек наиболее важно. На рисунке 2.8 представлено несколько фильтрограмм в линии $H\alpha$ вспышки на лимбе, полученных в отраженном от зеркальной щели свете.

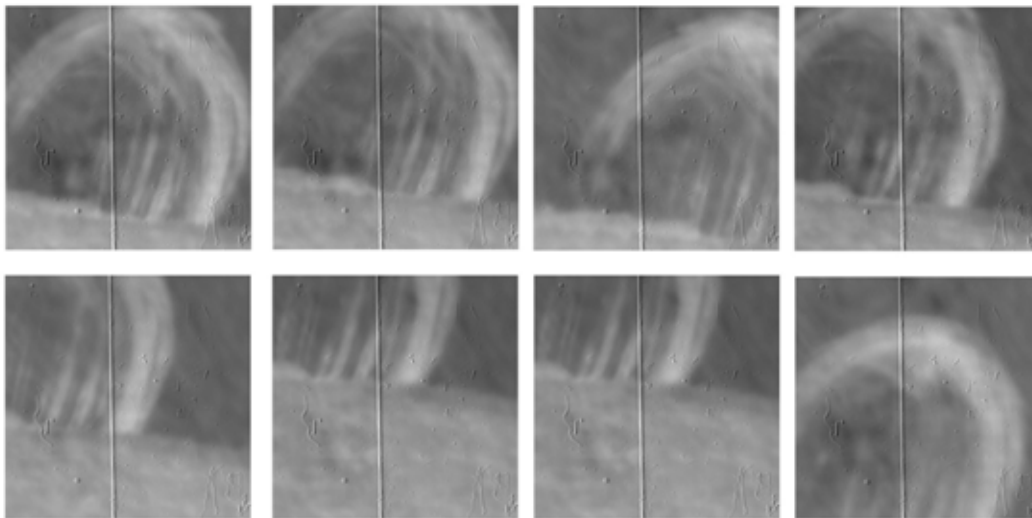


Рисунок 2.8 – Фильтрограммы в линии $H\alpha$ лимбовой вспышки. Вертикальная линия – щель спектрографа.

Параллельно с регистрацией спектрограмм производилась регистрация спектров в линиях $H\alpha$ и $FeI\ 6302\text{\AA}$. При наблюдении вспышки на лимбе фотосферная линия железа, естественно, не зарегистрирована (рисунок 2.9). Если бы вместо $FeI\ 6302\text{\AA}$, мы поставили второе камерное

зеркало на $H\beta$ или на другую хромосферную линию, то на рисунке 9 мы бы получили 4 линии.
При наблюдении лимбовых вспышек это нужно учесть.

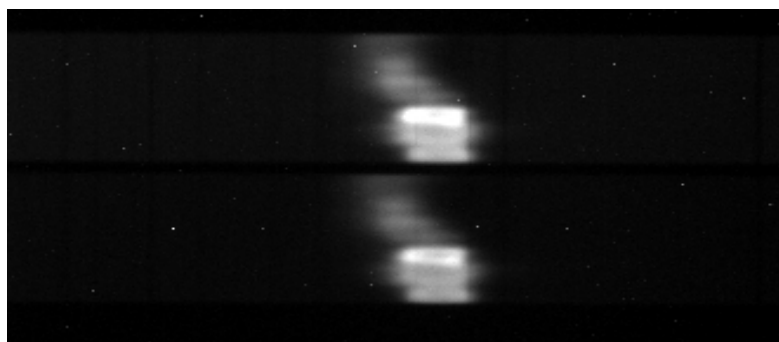


Рисунок 2.9 – Лимбовая вспышка в $H\alpha$.

3 Испытания и опытные наблюдения на солнечном телескопе для измерения крупномасштабных магнитных полей

Телескоп предназначен для получения экспериментальных данных о КМП Солнца, основным из которых являются ежедневные двухминутные магнитограммы продольной составляющей полного вектора магнитного поля. Измерения производятся на уровне фотосферы Солнца с точностью 0,1 Гс для спокойных участков Солнца с угловым разрешением 40 угл. сек.

3.1 Общие сведения и принцип работы инструмента

Инструмент состоит из солнечного рефракторного телескопа горизонтального типа, снабженного оптически согласованным с ним спектрографом Литрова. С помощью этой системы строится изображение спектра в выбранном участке длин волн с магниточувствительной линией для заданной площадки изображения Солнца. Сканирование и тонкое гидирование изображения осуществляется с помощью ПЗС-камеры и приводов зеркал целостата путем смещения изображения относительно входной щели спектрографа и измерения его положения в инструментальной системе координат, жестко связанной с гелиографическими координатами. Сканирование изображения осуществляется в пошаговом режиме программно по заданному закону. При этом с помощью ПЗС-камеры регистрируется распределение интенсивности в полоске спектра для каждого участка изображения Солнца.

Физической основой метода измерений напряженности магнитного поля служит эффект Зеемана. В методе предполагается измерение распределения параметров Стокса по контуру магниточувствительной линии. Для выделения параметров Стокса используется электрооптический анализатор, расположенный за входной щелью спектрографа. При этом для каждого состояния анализатора производится регистрация интенсивности необходимое и достаточное количество раз для дальнейших расчетов параметров Стокса. Расчеты для получения значения напряженности выполняются по методу, применяющемуся в магнитографах Бэбкоковского типа. Для контроля нулевого уровня полезного сигнала используется дополнительный механический анализатор поляризованного света, установленный перед входным окном инструмента.

Система управления, регистрации и обработки данных инструмента позволяет сохранять данные, предварительно обрабатывать их, визуализировать вычисленные параметры в квазиреальном времени и управлять процессом измерения в интерактивном режиме.

Состав и характеристики основных узлов инструмента

В состав инструмента входят следующие системы и узлы, отличающиеся по функциональному назначению.

1. Узел механического модулятора (ММ).

ММ состоит из электромеханического привода и фазовой $\lambda/2$ -пластинки и позволяет модулировать свет перед входным окном телескопа на частоте 1 Гц с целью разделения полезных сигналов Солнечного и инструментального происхождения.

2. Целостатная установка (ЦУ).

ЦУ предназначена для обеспечения часового ведения и тонкого гидирования изображения Солнца с точностью позиционирования 0,3 угл. сек. К целостату прикреплен ММ. Оптические оси ММ, ЦУ и телескопа всегда совпадают при наведении последнего на Солнце. Диаметр зеркал ЦУ (150 мм) позволяет освещать объектив телескопа, диаметром 42 мм, невиньетированным пучком света в течение всего светового дня.

3. Станина-монтажная (СМ).

Все узлы телескопа, кроме ЦУ, крепятся на монолитной массивной станине длиной 4 м, жестко связанной с фундаментом телескопа, и съюстированной по меридиану и горизонту. При этом между собой все узлы связаны только через станину. СМ является одним из элементов стандартной оптической скамьи ОСК-2ЦЛ.

4. Блок координатометра (БК).

БК предназначен для построения изображения Солнца на входной щели спектрографа объективом телескопа и изображения входной щели предметным объективом на следящей ПЗС-матрице. Конструктивно все оптические элементы и, таким образом, их оптические оси жестко связаны, что позволяет сканировать изображение и удерживать его на входном окне регистратора (входная щель спектрографа) в гелиографических координатах. С помощью БК, приводов зеркал целостата и системы управления осуществляется программное сканирование и гидирование изображения Солнца.

5. Перестраивающая оптика (ПО).

ПО предназначена для преобразования расходящихся пучков света после входной щели спектрографа в параллельные пучки и коррекции угловой апертуры в сторону уменьшения с целью обеспечения нормальной работы модулятора и спектрографа.

6. Узел электрооптического анализатора (УЭА).

УЭА предназначен для поляризационного анализа квазимонохроматического света путем поочередного гашения параметров Стокса с помощью изменения поляризационных свойств

электрооптического ДКДП-кристалла, входящего в состав анализатора. Кроме кристалла в УЭА входят различные поляризационные и отсекающие фильтры, предназначенные для обеспечения калибровки измерений и выделения заданной спектральной полосы. Все элементы УЭА расположены между объективами ПО вблизи изображения входного окна телескопа.

7. Автоколлимационный спектрограф (АС).

АС оптически согласован с телескопом. Наличие электромеханических приводов фокусировки спектра и вращения дифракционной решетки вокруг оси, параллельной штрихам, обеспечивает быструю перестройку рабочей полосы спектра и его фокусировку.

8. Узел спектрофотометра (УС).

УС снабжен высокочувствительной ПЗС-матрицей с параметрами сенсора, оптически согласованного с размером изображения Солнца, характеристиками спектрографа и рабочим диапазоном длин волн. Работа ПЗС-матрицы синхронизирована с частотой переключения электрооптического анализатора, так что для каждого состояния анализатора регистрируется отдельный кадр распределения интенсивности в спектре.

Основные измерительные данные

Управление телескопом, сбор и обработка данных осуществляется программно, автоматически. Пространственное разрешение – $15 \div 60$ угл. сек. Точность позиционирования изображения при координатных измерениях – ± 2 угл. сек. Точность определения координат центра диска в инструментальной системе отсчета координат – ± 2 угл. сек. Точность определения оси вращения Солнца в инструментальной системе отсчета координат – ± 10 угл. мин. Величина дисперсии в основных измерениях для рабочего диапазона длин волн ($5000-6600 \text{ \AA}$) – $0,75 \text{ \AA}/\text{мм}$. Квантовая эффективность ПЗС-фотометра для рабочего диапазона длин волн ($5000-6600 \text{ \AA}$) – 95%. Максимальная частота кадров ПЗС-фотометра – 32 кадра/с. Максимальная точность измерения интенсивности в рабочем диапазоне спектра для одного пикселя ПЗС-матрицы – 10^{-5} (время накопления сигнала – 10 с). Измеряемые параметры – I,V-параметры Стокса. Данные, получаемые на основе измерений – значение напряженности магнитного поля для каждой точки изображения Солнца в Гауссах, Н (Гс). Точность измерения – 0,1 Гс.

3.2 Процесс наблюдения

Для измерений КМП была разработана специальная методика наблюдений, согласно которой производились опытные испытания всех систем с целью выяснения реальных измерительных характеристик инструмента, основным из которых является оперативность и точность измерений

КМП. Оперативность и точность, при выбранном методе измерений, светосиле прибора и чувствительности сенсора, зависят от продолжительности времени подготовки к основным измерениям и времени накопления сигналов магнитографа, определяемого отношением сигнал/шум для единичного цикла измерений.

Подготовка инструмента к измерениям заключается в следующем.

1. Наблюдатель включает питание электронных узлов телескопа с помощью программы управления. При этом на монитор компьютера выводится блок-схема, на которой показаны все автоматизированные узлы, включая блоки питания, концевые и нулевые датчики положения электроприводов. При необходимости, возможно тестирование каждого устройства путем активации программы тестирования.

2. По окончании режима инициализации электропривода зеркала слежения, склонения и фокусировки спектра устанавливаются в середины динамических диапазонов. Привод часовой ведения на повышенной скорости начинает отрабатывать часовой угол, соответствующий текущему времени (телескоп наводится на Солнце). Дополнительное зеркало целостата автоматически доворачивается в восточное или западное положение в зависимости от времени относительно полудня. Остальные приводы включаются на удержание текущего положения. Включаются ПЗС-матрицы и высоковольтный блок.

3. После выхода часовой оси целостата в координату часового угла Солнца автоматически включается часовая скорость. Наблюдателем производится юстировка зеркал целостата и фазовой пластинки с помощью дополнительных механических приводов вручную. При этом производится совмещение всех оптических осей. Контроль юстировки осуществляется с помощью ПЗС-матрицы (по изображению Солнца на входной щели спектрографа и положению спектра на ПЗС-фотометре). Ручная юстировка не требуется, если предыдущая осуществлялась менее двух-трех суток назад.

4. Если изображение Солнца захвачено ПЗС-матрицей координатометра, наблюдатель включает режим слежения «центр диска». При этом с помощью приводов зеркала склонения центр изображения Солнца совмещается с центром входной щели спектрографа. Время экспозиции одного кадра ПЗС-матрицы регулируется автоматически так, чтобы не было насыщения сигнала. Текущее положение центра изображения относительно входной щели спектрографа и положение приводов отображается в цифровом и графическом видах на мониторе. Если изображение Солнца по какой-либо причине не удерживается системой слежения с заданной точностью, то управление приводами приостанавливается.

5. Наблюдателем задается рабочая спектральная линия. При этом в пучок автоматически

вводится соответствующий широкополосный фильтр с помощью револьверного механизма. По умолчанию, при включении телескопа вводится фильтр основных наблюдений.

6. С помощью привода дифракционной решетки на ПЗС-матрице фотометра устанавливается изображение полосы спектра, включающей рабочую линию. Включается режим фокусировки спектра. Фокусировка может производиться полуавтоматически и автоматически с индикацией захвата фокуса, а также в следящем и дискретном режимах. Время экспозиции одного кадра ПЗС-матрицы регулируется автоматически, либо вручную.

7. Наблюдатель включает режим «суточная». При этом с помощью ПЗС-координатометра автоматически регистрируется положение суточной линии относительно входной щели спектрографа. В дальнейшем эти данные используются для привязки инструментальной системы отсчета координат сканирования изображения к гелиографическим координатам Солнца.

8. Производится настройка электрооптического модулятора, для чего включается режим «затвор». В пучок автоматически вводится циркулярный фильтр, соответствующий выбранному спектральному диапазону, а на ДКДП-кристалле устанавливается высокое напряжение, при котором наблюдается максимальное значение модуляции света в автоматическом, либо ручном режимах. Сигналы в режиме «затвор» регистрируются и сохраняются в основном файле данных. Режим «затвор» включается и далее, по мере необходимости. Рабочее напряжение в промежутках между измерениями регулируется с учетом функциональной зависимости его от температуры кристалла в следящем режиме. По окончании режима «затвор» фильтр выводится из пучка.

9. Производится калибровка ПЗС-фотометра с целью определения коэффициентов усиления всех каналов ПЗС-матрицы и значений темновых сигналов. Для первого случая имитируется плоское поле на ПЗС-матрице. Данная процедура производится эпизодически, по мере необходимости, так как требует значительного времени. Темновые сигналы регистрируются при перекрытом световом пучке каждый раз, непосредственно перед основными измерениями. Данные используются, в дальнейшем, для корректировки основных измерений.

10. Включается режим «линия». Наблюдателем задаются следующие параметры: тип спектральной линии (поглощение/излучение); длина волны магниточувствительной линии; длины волн реперов; ширина и разведение щелей магнитографа; фактор Ланде для рабочей линии. Эти данные используются для расчета значений доплеровской скорости и магнитного поля во время измерений.

11. Задаются координаты сканирования изображения Солнца относительно центра входной щели спектрографа и режимы измерений: шаг сканирования (в угл. сек.); начальные и конечные координаты сканирования (в угл. сек.); время накопления для ПЗС-фотометра (экспозиция кадра (в

мс); количество циклов модулятора для одного измерения; количество циклов фазовой пластинки для одного измерения; максимальные и минимальные значения интенсивности, при которых измерения приостанавливаются; тип измерений (магнитограмма, скан, калибровка модулятора, калибровка ПЗС-фотометра и др.); параметры объективов и входной щели спектрографа; время задержки измерений после изменения положения фазовой пластинки и т. д.

В режиме получения стандартной магнитограммы КМП устанавливаются рекомендованные значения параметров и режимов системы по умолчанию. В случае, если наблюдатель совершил ошибку, либо система не вошла в штатный режим, генерируется соответствующее сообщение и рекомендации к дальнейшим действиям.

На этом подготовка инструмента к наблюдениям заканчивается, и наблюдатель включает основной режим измерений для получения магнитограммы. В этом режиме система может работать полностью автоматически.

После включения основного режима происходит следующее.

1. Система гидирования и сканирования устанавливает изображение на входной щели спектрографа в начальные координаты в соответствии с заданным растром сканирования (первый разрез изображения) и начинается непосредственно сканирование.
2. Автоматически создается файл. Файл закрывается после окончания раstra сканирования, либо в любой момент принудительного или аварийного завершения измерений.
3. Для каждого такта работы модулятора регистрируется распределение интенсивности в спектре с введенной и выведенной фазовой пластинкой перед целостатом.
4. В окне программы появляются в графическом и цифровом виде значения измеренных и вычисленных параметров предыдущего разреза с последующим обновлением.
5. В любой момент измерения могут быть приостановлены и продолжены автоматически или вручную, если в какой-то промежуток времени не выполняются какие-либо условия наблюдений, а затем возвращаются в заданные.
6. Качество данных может оцениваться наблюдателем в ходе измерений путем анализа значений измеряемых параметров, представляемых на мониторе в виде графиков и таблиц.
7. Получение магнитограммы производится по окончании сканирования с помощью специальной программы обработки исходных данных. Данные, получаемые в ходе измерений и при окончательной обработке, могут отличаться, так как расчеты в первом случае выполняются с помощью оптимизированного, более быстрого алгоритма, при котором отсутствуют паузы в измерениях из-за загруженности компьютера.

3.3 Содержание файлов данных и магнитограмм

Структура файла данных не зависит от типа измерений и определяется размером единичного цикла измерений. Структура данных стандартизирована и не зависит от имени файла (имя файла служит только для определения типа измерений и используется в дальнейшей обработке). Вся информация, начиная с UT и заканчивая параметрами состояния системы, регистрируется и сопровождает все файлы одинаково.

Содержание файлов данных

1. Имя файла: дата по UT, тип данных, номер для данного типа данных последовательно по времени получения в пределах даты (обновляется при смене даты);
2. матрица значений интенсивности, получаемых с помощью ПЗС-Ф;
3. спецификации измерительной матрицы (ПЗС-Ф);
4. название телескопа;
5. место расположения телескопа (широта, долгота);
6. название обсерватории;
7. матрица X, Y – координата сканирования для каждого кадра;
8. признак состояния электрооптического модулятора;
9. признаки состояния электрооптического модулятора;
10. угловое положение оси вращения Солнца относительно направления щечек входной щели спектрографа;
11. фокусное расстояние объектива телескопа;
12. световой диаметр объектива телескопа;
13. масштаб изображения на координатной ПЗС-матрице (ПЗС-К);
14. масштаб изображения на измерительной ПЗС-матрице(ПЗС-Ф);
15. спецификации координатной матрицы;
16. размер входной щели спектрографа по «X»;
17. номер ДКДП кристалла;
18. фокусное расстояние объектива спектрографа;
19. параметры дифракционной решетки;
20. порядок спектра;
21. величина линейной дисперсии;
22. значение экспозиции для одного кадра ПЗС-Ф;

23. количество экспозиций для единичного измерения;
24. количество повторений измерений для одного положения Солнца относительно щели спектрографа;
25. размер бинирования для ПЗС-Ф;
26. период свертки по строкам для ПЗС-Ф;
27. ФИО наблюдателя;
28. матрица калибровочных коэффициентов для каждого единичного измерения;
29. каждый регистрируемый параметр сопровождается отсчетом времени в системе UT.

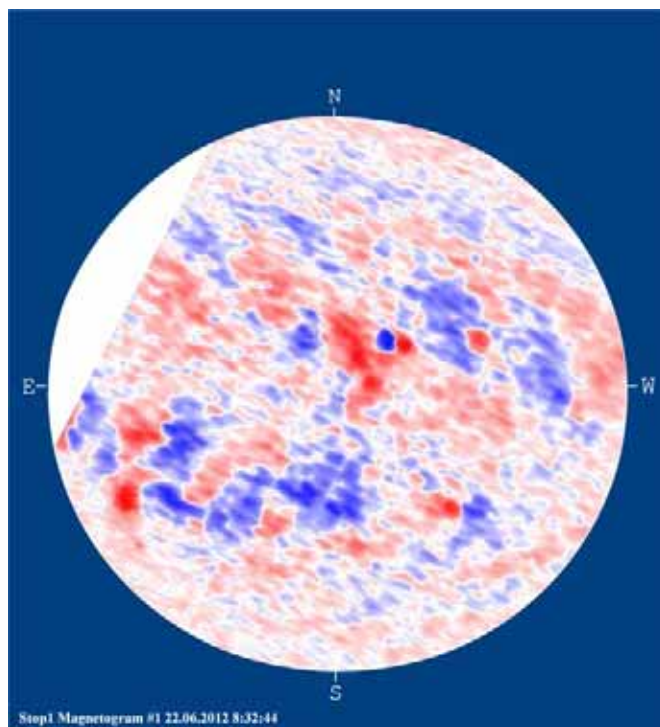
Содержание файлов магнитограмм

Магнитограмма представляет собой двумерную матрицу значений напряженности КМП в гауссах. Каждое значение КМП сопровождается отсчетами координат в декартовой системе координат с началом в центре изображения Солнца в угловых секундах, а также временами измерения в системе UT.

1. магнитограмма;
2. название обсерватории и телескопа;
3. дата в UT;
4. среднее время получения магнитограмм в UT;
5. интервал времени, за который была получена магнитограмма;
6. L_0 , B_0 , R_{\odot} для среднего времени получения магнитограммы;
7. апертура в угловых секундах (ΔX_A , ΔY_A);
8. шаг по X и Y в угловых секундах (ΔX , ΔY);
9. параметр (H_{\parallel} , H_{\perp} , φ);
10. положение оси вращения Солнца относительно строки матрицы или оси X;
11. точность измерений для каждого значения КМП (s, RMS);
12. качество изображения или данных;
13. способ калибровки;
14. размер щелей и разведения для магнитографа;
15. аппаратная функция спектрографа;
16. рабочая линия;
17. ФИО наблюдателя.

3.4 Первая магнитограмма

В качестве примера на рисунке 3.1 приводится первая магнитограмма продольного КМП, полученная на солнечном телескопе 22 июня 2012 года в линии FeI 6302.508 Å, а на рисунке 3. 2, для сравнения, приведены магнитограммы Стенфордской и Динамической обсерваторий, полученные примерно в одно и то же время.



Белый цвет : $H = \pm 0,1$ Гс. Синий цвет : $H = -0,1; -0,2; -0,5 \dots -50$ Гс. Красный цвет : $H = +0,1; +0,2; +0,5 \dots +50$ Гс. Угловое разрешение : ~ 40 угл. сек. Точность измерений : $\pm 0,1$ Гс.
Магниточувствительная линия : FeI 6302.508 Å.

Рисунок 3.1– Магнитограмма, полученная в БАО СО РАН 22 июня 2012 г. на солнечном телескопе КМП.

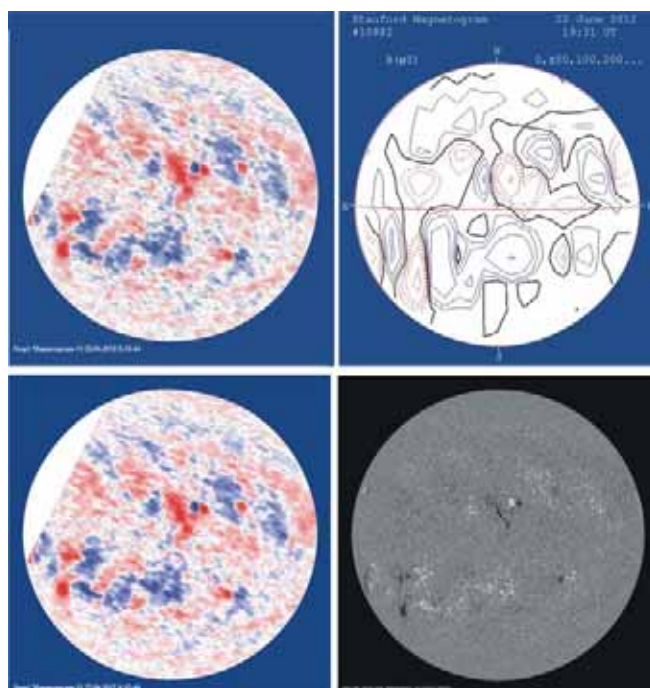


Рисунок 3.2.– Магнитограммы, полученные в различных обсерваториях: БАО, Стенфорд, SDO

Качественный анализ позволяет сделать вывод о хорошем согласии данных, хотя сравнение данных, полученных с различным пространственным и временным разрешением, а также с различной точностью, не совсем корректно. Тем не менее, видно, что структура поля, его распределение по широте и долготе и особенно линия раздела полярностей хорошо совпадают. В измерениях КМП особенно важно как можно точнее определить линию раздела полярности магнитного потока в его распределении по диску Солнца. На солнечном телескопе метод контроля нулевого уровня сигнала позволяет определить нулевой поток поля не хуже точности абсолютных измерений. Для контроля точности метода определения нулевого уровня сигнала магнитографа производились дополнительные расчеты с использованием теллурических линий, а именно в линиях молекулярного кислорода $\lambda\lambda$ 6302.005 и 6302.771 Å . Выбранная рабочая магниточувствительная линия FeI 6302.508 Å для измерений КМП имеет преимущество по отношению к другим линиям потому, что она лежит как раз между этими немагнитными линиями. Поэтому все линии регистрируются одновременно. Индикатором точности контроля нулевого уровня является величина значений напряженности КМП, вычисленных для теллурических линий, так как это делается в рабочей линии. Расчеты показали, что значения КМП находятся в пределах нуля, с точностью $\pm 0,1$ Гс для всего диска Солнца, причем при разных значениях степени инструментальной поляризации (при различных положениях зеркал целостата).

В процессе опытных наблюдений, выяснилось, что реальные измерительные характеристики

магнитографа оказались не хуже расчетных. К основным преимуществам инструмента можно отнести высокую степень стабильности работы всех систем (на протяжении примерно двух месяцев не возникло разъюстировки оптики, отказа электромеханических узлов и электроники), простоту в эксплуатации, несущественное время подготовки инструмента к основным измерениям (примерно три минуты) по сравнению с временем получения магнитограммы КМП (примерно пятнадцать минут), при сохранении высокой точности измерений ($\pm 0,1$ Гс).

Существенным достоинством инструмента являются его метрологические свойства, которые практически не зависят от степени подготовленности наблюдателя. Тем самым обеспечивается высокая однородность и точность данных, которые практически зависят только от астроклиматических и погодных условий обсерватории, в которой производятся наблюдения.

4 Введение 10-антенного интерферометра в режим регулярных наблюдений

Основным заданием 4-го этапа Контракта на УСУ ССРТ являлся запуск в регулярные наблюдения нового инструмента – 10-антенного интерферометра. Регулярность наблюдений подразумевает, что все аппаратные и программные части инструмента работают стабильно, определены процедуры калибровок и диагностики, зафиксированы форматы выходных данных и разработано программное обеспечение для сбора данных и их первичной обработки. Программы сбора данных должны быть включены в общее расписание наблюдений обсерватории, данные и программы обработки данных должны быть в свободном доступе по сети Интернет.

4.1 Испытания программно-аппаратных частей приемной системы 10-антенного интерферометра

Стабильность работы различных частей интерферометра проверялась во время тестовых наблюдений. Следующие системы 10-антенного интерферометра были испытаны за отчетный период: система регистрации мощности отклика антенны в каждом цифровом приемнике, система коррекции геометрической задержки с шагом 0.1 нс вместо прежней с шагом 1 нс, система остановки бегущей интерференционной картины с учетом второго преобразования частоты сигнала и система определения постоянных задержек в приемном тракте гелиографа. Задержки связаны, прежде всего, с разницей длин оптических кабелей, передающих сигнал от антенн к рабочему зданию.

Для системы регистрации были разработаны коррелятор с 44-битным накопительным регистром и алгоритм синхронизации данных приемника и коррелятора. Алгоритм заключается в следующем. Цифровой приемник получает аппаратную информацию о текущей поляризации принятого сигнала и о текущей частоте. По любому изменению (поляризации или частоты) вырабатывается прерывание, обрабатываемое программой, исполняемой процессором Nios II. Обработчик прерывания, определив тип прерывания (поляризация или частота), либо забирает текущие данные об отклике антенны для программного накопления, либо отправляет накопленные данные программе сбора данных. Программное накопление данных производится для чисел в формате плавающей запятой с двойной точностью. Таким образом, удается без насыщения копировать результат автокорреляции 12-битных исходных данных (с частотой оцифровки в 100 МГц) на интервалах длительностью 0.1-0.2 секунды. Программа сбора данных, получив данные о мощности сигнала от конкретного приемника, помещает их в определенную колонку и текущую строку таблицы данных радиогелиографа, сохраняемую в виде расширения BINTABLE файлов

FITS формата.

Геометрические задержки - это разность времени прихода плоского волнового фронта от Солнца на разные антенны радиоинтерферометра. Традиционно, для многоэлементного радиоинтерферометра задержки рассчитываются относительно выбранного фазового центра O . Компенсация задержек производится в тракте каждой антенны. Геометрическую задержку можно определить как $\tau_g^k = \vec{b}^k \cdot \vec{s} / c$, где k - номер антенны, \vec{b}^k - вектор базы (координаты антенны относительно фазового центра), \vec{s} - направление на источник излучения, c - скорость света. Однако, при вычислении функций взаимной когерентности пары антенн, имеют значение только разности задержек $\tau_g^{ki} = (\vec{b}^k - \vec{b}^i) \cdot \vec{s} / c$. В принципе можно корректировать такие разности для каждой пары антенн, но это требует более сложной схемы приемного тракта, чем при компенсации задержки на каждой антенне. Задержка τ_g^k эквивалентна линейному наклону фаз в спектре сигнала и поэтому компенсация задержки - это компенсация соответствующего фазового наклона. В настоящее время нет технической возможности компенсировать фазовый наклон на частотах рабочего диапазона радиогелиографа 4 – 8 ГГц. Поэтому компенсация производится на промежуточных частотах, что приводит к появлению бегущей интерференционной картины (интерференционных лепестков).

Остановка интерференционных лепестков производится тоже на промежуточных частотах, путем внесения переменной во времени фазы в сигнал каждой антенны. Фактически фаза вносится в сигналы вторых гетеродинов LO_2 , представляющих собой управляемые цифровые генераторы, объединенные сигналом тактовой частоты. Второе преобразование частоты необходимо для понижения требований к линиям передачи данных от цифровых приемников к коррелятору. Смесители с подавлением зеркального канала, используемые при первом преобразовании частоты имеют полосу промежуточных частот в диапазоне 10-50 МГц. Поэтому первая промежуточная частота выбирается равной 22 МГц. При полосе частот сигнала в 10 МГц можно выбрать вторую промежуточную частоту равной, скажем, 6 МГц. Тогда весь полезный сигнал будет сосредоточен в полосе частот 1-11 МГц, что минимизирует требования к линии передачи данных. Постоянная составляющая отсекается для того, чтобы подавить влияние смещений нулевого уровня на входах АЦП.

Компенсация задержки в цифровых приемниках радиогелиографа реализуется в две стадии. Грубая задержка определяется частотой оцифровки и ее шаг равен 10 нс. Точная задержка реализуется путем соответствующего выбора импульсной характеристики цифрового фильтра, определяющего полосу частот принятого сигнала. Шаг точной задержки ограничен лишь ресурсом

логических схем. Практика показывает, что при шаге точной задержке равном 0.1 нс, искажения взаимной корреляции малых баз становятся приемлемыми. Чтобы обеспечить такой шаг, было увеличено число импульсных характеристик цифрового фильтра до сотни, и были внесены изменения в IP-ядро и программное обеспечение цифровых приемников. Характеристики КИХ фильтра, используемого обеспечения для требуемой точности задержки показаны на рисунке 4.1.

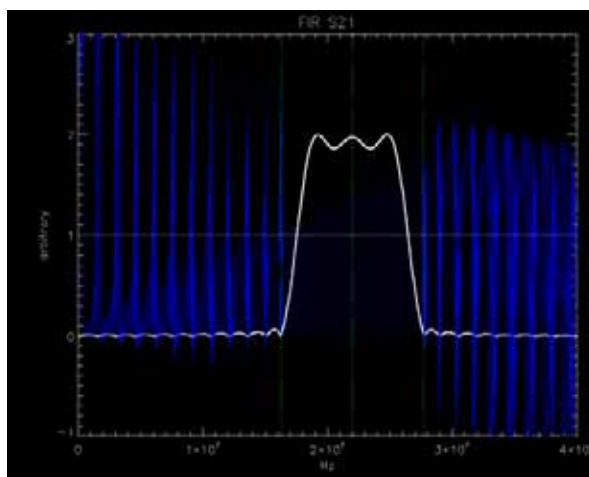


Рисунок 4.1 – Фазовые характеристики цифрового КИХ фильтра, используемого для точной компенсации геометрических задержек.

Колебания на выходе коррелятора (бегущая интерференционная картина) обусловлены появлением в фазовой характеристике членов, не зависящих от частоты, но зависящих от времени. Причина их появления — формирование геометрической задержки происходит на исходной частоте, а компенсация реализуется на промежуточных частотах. В фазе сигналов промежуточной частоты присутствуют фазы сигналов гетеродинов, не претерпевших задержки, но подвергнутых компенсации. Частота колебаний на выходе коррелятора определяется производной по времени от геометрической задержки. Максимальная частота этих колебаний для пары антенн, находящихся на краях Восток-Запад радиогелиографа, будет определяться как $\Omega_{max} = 127\Omega_{earth}\omega_{101}b/c$, где $\Omega_{earth} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$ - угловая скорость вращения Земли, $b = 4.9 \text{ m}$ - минимальная база радиогелиографа, c — скорость света, ω_{101} - частота первого гетеродина. Для частоты первого гетеродина 8 ГГц значение максимальной частоты колебаний будет примерно 1.2 Гц. При такой частоте нельзя вести накопление с длительностью 0.1-0.2 с, и, соответственно, повышается поток данных от коррелятора к программе сбора данных. Выходом из этой ситуации является остановка бегущей интерференционной картины и, соответственно, понижение частоты колебаний на выходе коррелятора. Необходимо отметить, что изменения сигнала на выходе коррелятора вызваны не только бегущей интерференционной картиной, но и формой пространственного спектра

исследуемого объекта. Выход каждой ячейки коррелятора связан с определенной траекторией на uv -плоскости. Поэтому изменения выхода коррелятора при остановке бегущей интерференционной картины обусловлены формой пространственного спектра.

В приемной системе радиогелиографа используются два преобразования частоты принимаемых сигналов. Цель второго преобразования: понизить скорость передачи данных от цифровых приемников к коррелятору и сформировать аналитический сигнал. Наряду с этими задачами осуществляется и остановка интерференционных лепестков путем управления фазой второго гетеродина. Необходимая добавка к фазе для антенны с номером k вычисляется следующим образом $\delta\varphi_g = \omega_{101}\tau_g^k + \omega_{102}\delta\tau_g^k$, где $\delta\tau_g^k$ - разность между требуемой задержкой и реальной задержкой, которая обусловлена конечным шагом изменений задержки. Поправки к фазе вычисляются для каждого периода переключения поляризации 7 мс. Целая часть от поправки вносится в фазу цифрового гетеродина. Шаг изменения фазы составляет, примерно, 0.35° .

Кроме задержек обусловленных проекцией базы интерферометра в тракте присутствуют задержки связанные, например, с различной длиной линий передачи данных от антенн к рабочему зданию. В нашем случае, это оптические кабели, длина которых может изменяться в таких пределах, что соответствующие разницы в задержках могут достигать десятков нс в то время, как максимальная задержка для минимальной базы радиогелиографа меняется в пределах 16 нс. Вообще, для полосы частот радиогелиографа в 10 МГц, задержка равная 100 нс приводит к полной потере сигнала. Поэтому необходимо измерение фиксированных задержек и внесение их в тракт каждой антенны наряду с геометрической задержкой.

Для решения этой задачи была разработана следующая методика. В качестве тестового объекта наблюдений выбирается один из геостационарных спутников, например Ямал 201 или Wopum 1. Расстояние до спутников таково, что кривизна волнового фронта принятого от них излучения на самых удаленных друг от друга антеннах радиогелиографа обуславливает задержки порядка 0.01 нс, которыми можно пренебречь и считать, что объекты находятся в дальней зоне радиогелиографа. Это позволяет рассчитывать требуемые геометрические задержки для спутников обычным образом. Алгоритм определения фиксированных задержек следующий. Прежде всего, определяются спутник и частоты, на которых есть его излучение, а затем выбирается момент наблюдений и антенны наводятся на спутник. После чего рассчитываются требуемые геометрические задержки, и начинается цикл сканирования задержек выбранной опорной антенны. Так как на всех остальных антеннах установлены требуемые задержки, то максимумы отклика от каждой пары антенн, содержащей опорную антенну должны совпадать по времени. Интервалы времени между этими максимумами обусловлены фиксированными задержками.

Относительные задержки определяются разницей во времени между максимумами сигналов с моментом времени, когда задержка на опорной антенне равна требуемой.

4.2 Калибровка и диагностика 10-антенного интерферометра

Калибровка — определение масштабирующих коэффициентов для перевода данных в плотность потока микроволнового излучения. Для получения таких коэффициентов используются либо абсолютные калибровки — измерение антенной температуры путем сравнения уровня сигнала с неким стандартом, либо относительные — измерение разности в уровнях сигнала при наведении антенны на Солнце и на небо. В последнем случае необходимо привлечение независимых данных о плотности потока излучения Солнца на данной частоте. Для солнечных интерферометров, характеризуемых большим количеством антенн, выгоднее использовать относительные калибровки. В настоящее время для калибровки 10-антенного интерферометра используются данные спектрополяриметров Нобеяма (Япония) интерполируемые на сетку частот 10-антенного интерферометра. Уровень сигнала от неба записывается в конце дня наблюдений, во время возврата антенн на углы соответствующие наблюдениям на следующий день. Уровень сигнала от Солнца определяется по сигналам, измеряемым до момента начала перевода антенн. Если в это время наблюдаются всплески микроволнового излучения, то требуется ручная работа по определению уровня спокойного Солнца. Данные спектрополяриметров ожидаются в виде обычного текстового файла. По результатам калибровки создаются два файла, содержащие данные об уровнях неба и спокойного Солнца на всех частотах и для обеих круговых поляризаций. Во время регулярных наблюдений, публикуемые в сети Интернет данные калибруются именно таким способом.

Диагностика состояния приемной системы реализуется путем вывода на консоль оператора информации о состоянии различных узлов приемной системы 10-антенного интерферометра. Выводятся следующие параметры каждого цифрового приемника: индекс текущей частоты первого гетеродина, текущее время, геометрические задержки, фазы второго гетеродина, флаги состояния приемника: коррекция геометрической задержки, остановка интерференционных лепестков, использование табулированных данных или расчетных, мода использования списка частот: свипирования или ручного выбора частоты. Дополнительно выводятся значения задержек каждого цифрового приемника, выравнивающих фазы сигнала с частотой выборки данных из фильтров низкой частоты, перед их отправкой в коррелятор и смещения разрядов АЦП — в цифровом приемнике используются 9-разрядные вычисления, в то время как разрядность АЦП 12 бит.

4.3 Форматы выходных данных 10-антенного интерферометра

В настоящее время используется два формата выходных данных 10-антенного интерферометра: MS2 (<http://casa.nrao.edu/>) и FITS (http://archive.stsci.edu/fits/fits_standard/). MS2 (Measurement Set version 2) используется для совместимости с пакетом обработки астрономических данных CASA. FITS формат предназначен для общего пользования. Так как конкретный вид формата FITS разработан непосредственно для данных 10-антенного интерферометра, а в будущем — для 96-антенного радиогелиографа, то на нем можно остановиться подробнее.

За основу выбрано хранение данных в расширении FITS формата: BINTABLE. Поэтому от обычного FITS файла, практически, используется только заголовок, где указываются координаты обсерватории (OBS-LAT, OBS-LONG, OBS-ALT), дата и время начала и конца наблюдений (DATE-OBS, TIME-OBS, DATE-END, TIME-END), название инструмента (INSTRUME) и ширина полосы частот одного канала в МГц (FR_CHAN). Флаг EXTEND указывает на наличие расширения в файле.

Расширение типа BINTABLE представляет собой таблицу, содержащую 135 колонок (количество колонок может быть изменено в будущем) и количество строк, определяемое числом частот 10-антенного интерферометра в данной программе наблюдений. Заголовок BINTABLE содержит полное описание данных, выдержанное в рекомендациях стандарта FITS. Доступ к данным возможен стандартными средствами: C++ (CCfits), Python (pyfits) и IDL (readfits+tbget). Поле NAXIS1 содержит ширину таблицы в байтах, поле NAXIS2 — число строк в таблице. Поле TFIELDS содержит число столбцов, следующие за ним пары полей TTYPE_n, TFORM_n содержат описание формата данных каждой колонки таблицы. Первая колонка содержит частоты первого гетеродина, вторая — времена для каждой частоты. 10-антенный интерферометр последовательно собирает данные на различных частотах, поэтому каждой частоте в соответствие ставятся вектор времен (поле TIME) и набор комплексных функций взаимной когерентности (V_{nnn}_RCP, V_{nnn}_LCP). Дополнительной информацией являются данные о мощности отклика (A_{nnn}_RCP, A_{nnn}_LCP), полученные в каждом цифровом приемнике, а не корреляторе (см. выше) и поля с префиксом PM_, содержащие данные о текущих фазах антенн. Поля PM_ являются временными и будут убраны в будущем из выходных файлов. Имя таблицы содержится в поле EXT_NAME.

4.4 Расписание и настройки программы сбора данных 10-антенного интерферометра

Расписание программ управляющих 10-антенным интерферометром приведено в соответствии с расписанием наблюдений ССРТ. Цифровые приемники и коррелятор получают

питание одновременно с выдачей питания 27 В на систему управления антеннами ССРТ. По включению питания конфигурируются все ПЛИС и загружаются программы в цифровые приемники и коррелятор. За минуту до начала наблюдений на ССРТ запускается программа сбора данных, это реализуется средствами операционной системы (в данном случае Linux, Scheduled Tasks). В течение минуты программа сбора данных должна проверить работоспособность приемников и коррелятора. Если какой-то приемник не доступен, то это видно на панели управления программы protot. На рисунках 4.2 и 4.3 показаны панели управления программой protot в упрощенном и расширенном режиме диагностики. Первой операцией после старта наблюдений является создание массива выходных файлов. Затем следует операция выравнивания фаз всех частот выборки цифровых приемников. Эти частоты в четыре раза ниже общей тактовой частоты приемников и коррелятора. Причина разности фаз – разные моменты подачи питания на приемники. Для выравнивания фаз используется особенность последовательной передачи данных от приемников к коррелятору. Данные передаются в каждом трех битах четырех битовой посылки. Поэтому, выключив мощность гетеродина (т.е. положив все биты данных равными 0) и установив самый младший бит посылки равным 1, можно перебрать четыре величины задержки для каждой линии так, чтобы добиться минимума сигнала на выходе соответствующего коррелятора. Эта задержка и будет искомой.

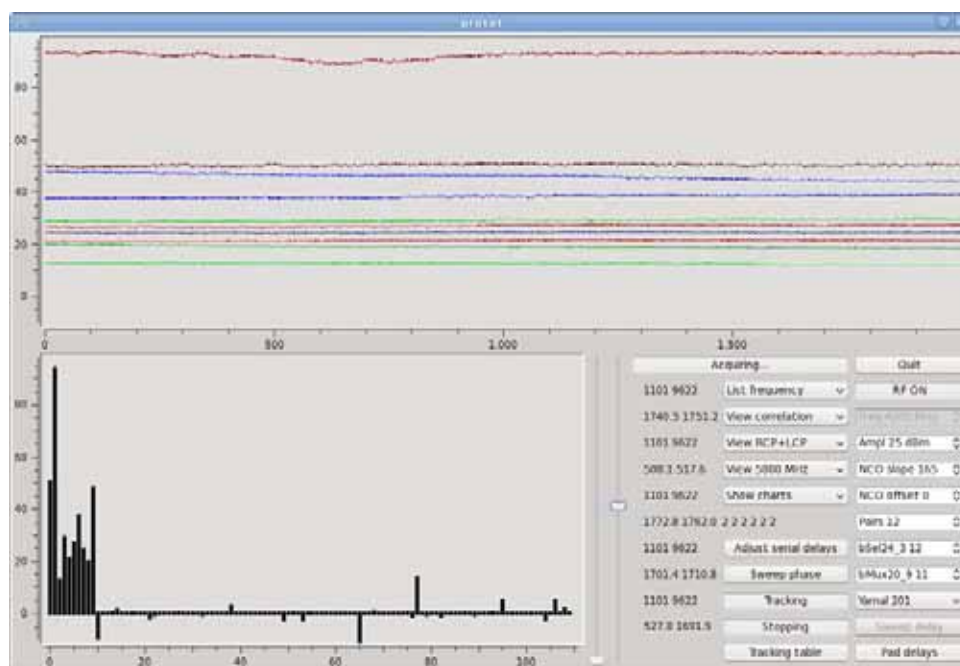


Рисунок 4.2 – Программа сбора данных 10-антенного интерферометра. Временные профили вверху – интегральные потоки микроволнового излучения, диаграмма внизу слева – текущие значения взаимной когерентности для всех парных комбинаций. Внизу справа – средства управления и диагностики.

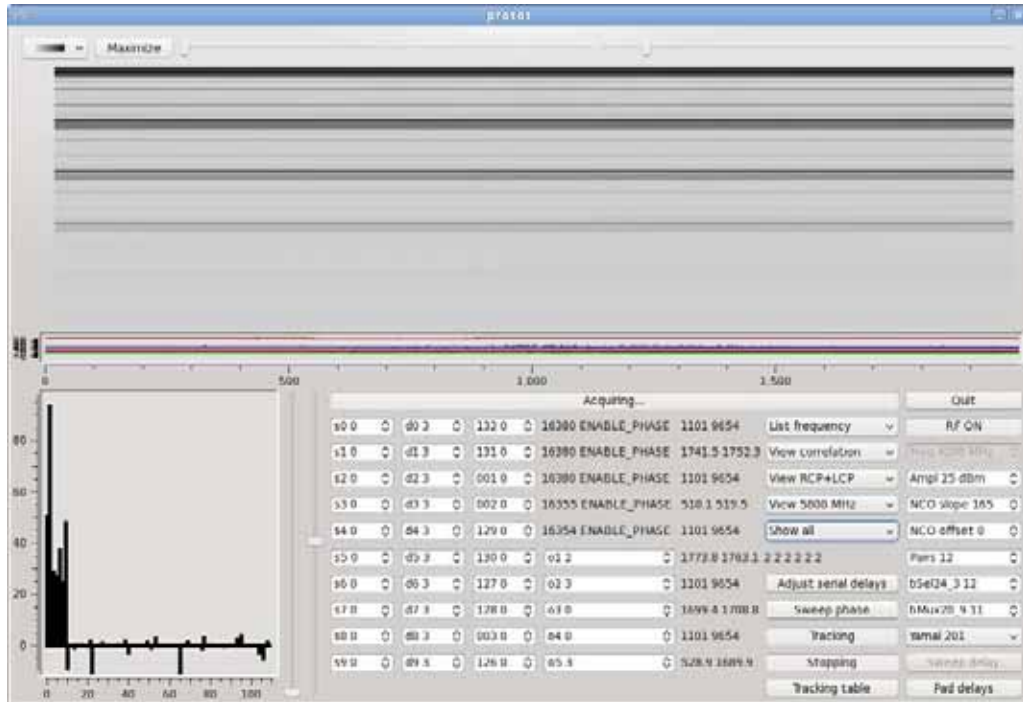


Рисунок 4.3– Программа сбора данных 10-антенного интерферометра. Тоновое изображение вверху – значения всех выходов коррелятора на всех частотах, диаграмма внизу слева – текущие значения взаимной когерентности для всех парных комбинаций. Внизу справа – средства управления и расширенной диагностики.

Работа программы protot определяется конфигурационным файлом, некоторые разделы которого показаны и объяснены ниже в Таблице 4.1.

Таблица 4.1

[NCO]	Настройки цифрового (второго) гетеродина.
ncoEnable=true	Флаг разрешения работы.
phaseLo=0	Начальная фаза ($0-1023=2\pi$).
slopeLo=165	Начальная частота ($\nu=0.103*\text{slopeLo}$).
fringeStopping=true	Флаг остановки интерференционных лепестков.
[agilent]	Настройки аналогового (первого) гетеродина.
frequency0=3500	Начальная частота при свипировании МГц.
frequency1=8500	Конечная частота при свипировании МГц.
frequencyPeriod=3	Число периодов накопления на одной частоте.
frequencyStep=5	Шаг по частоте МГц.
loAmplitude=25	Выходная мощность гетеродина дБм.

loFrequency=7400	Текущая частота.
rfOn=true	Флаг разрешения работы.
[delay]	Настройки, используемые при измерении фиксированных задержек.
sweepRange=4000	Диапазон изменения задержки нс.
sweepRefAntenna=4	Антенна, относительно которой измеряются задержки.
[file]	Настройки выходных файлов данных.
filesAmount=45	Максимальное количество файлов
msCreateHour=23	Время создания MS2
msCreateMinute=59	Время создания MS2
msCreateSecond=0	Время создания MS2
quitHour=10	Время завершения работы.
quitMinute=31	Время завершения работы.
quitSecond=0	Время завершения работы.
secondsPerFile=910	Длина файла в секундах.
startHour=0	Время начала сбора данных.
startMinute=0	Время начала сбора данных.
startSecond=0	Время начала сбора данных.
stopHour=10	Время окончания сбора данных.
stopMinute=30	Время окончания сбора данных.
stopSecond=0	Время окончания сбора данных.
storePath=/home/serg/SSRT/data/prototype/	Маршрут хранения данных.
[frequencyList]	Настройки рабочих частот
frequencyListPeriod=1	Число накоплений выходного сигнала коррелятора на одной частоте.
frequencyListSize=5	Число рабочих частот.
IFrequency0=4200	Частота МГц.
IFrequency1=4900	Частота МГц.
IFrequency2=5800	Частота МГц.
IFrequency3=6900	Частота МГц.
IFrequency4=7400	Частота МГц.
listFrequency=true	Флаг разрешения использования списка частот.

[nios]

antenna0=132	Настройки процессоров цифровых приемников и коррелятора.
antenna1=131	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna2=1	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna3=2	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna4=129	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna5=130	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna6=127	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna7=128	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna8=3	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
antenna9=126	Соответствие индекса номеру антенны ССРТ.
clock=25000000	Тактовая частота коррелятора Гц.
ip0=192.168.0.55	IP адрес коррелятора.
ip1=192.168.0.54	IP адрес цифрового приемника.
ip2=192.168.0.56	IP адрес цифрового приемника.
ip3=192.168.0.57	IP адрес цифрового приемника.
ip4=192.168.0.58	IP адрес цифрового приемника.
ip5=192.168.0.59	IP адрес цифрового приемника.
oDelay0=2	Задержка последовательного выхода цифрового приемника.
oDelay1=1	Задержка последовательного выхода цифрового приемника.
oDelay2=1	Задержка последовательного выхода цифрового приемника.
oDelay3=1	Задержка последовательного выхода цифрового приемника.
oDelay4=3	Задержка последовательного выхода цифрового приемника.
packetsPerFile=3250	Количество сетевых пакетов в выходном файле данных.
padDelay0=60	Фиксированная задержка антенны.
padDelay1=61	Фиксированная задержка антенны.
padDelay2=24	Фиксированная задержка антенны.
padDelay3=42	Фиксированная задержка антенны.
padDelay4=42	Фиксированная задержка антенны.
padDelay5=48	Фиксированная задержка антенны.

padDelay6=0	Фиксированная задержка антенны.
padDelay7=0	Фиксированная задержка антенны.
padDelay8=28	Фиксированная задержка антенны.
padDelay9=30	Фиксированная задержка антенны.
port=1026	IP порт для обмена с коррелятором и цифровыми приемниками.
prototypeReceivers=6	Количество приемников + коррелятор.
secondsPerHardwarePeriod=0.014	Время накопления данных в аппаратной части коррелятора.
softwareAccumPeriod=20	Время накопления данных в программной части коррелятора.

[satellite]

	Параметры геостационарных спутников для калибровки.
satellite0=Bonum 1	
satellite0_altitude=17.0	Высота в градусах.
satellite0_azimuth=233.0	Азимут в градусах.
satellite1=Yamal 201	
satellite1_altitude=29.7	Высота в градусах.
satellite1_azimuth=195.4	Азимут в градусах.
satellites=2	Количество спутников.
curSatellite=1	Текущих индекс спутника.

[scpi]

	Сетевые параметры аналогового (первого) гетеродина.
ip=192.168.0.48	IP адрес.
port=5025	IP порт.

4.5 Публикация данных в сети Интернет

Данные 10-антенного интерферометра публикуются в сети Интернет в реальном времени на сайте обсерватории http://badary.iszf.irk.ru/prototype_10.php, FITs файлы доступны по адресу <ftp://badary.iszf.irk.ru/Public/data/prototype10>. Обработка данных в реально времени ведется на языке Python. Программу mfPlot.py можно посмотреть здесь: <ftp://badary.iszf.irk.ru/Public/software/Python>. Предварительную обработку данных можно проводить с помощью программы xProtoFits.pro в среде IDL (<ftp://badary.iszf.irk.ru/Public/software/IDL>).

Наличие записей всплесков солнечного микроволнового излучения можно оперативно проверить в каталоге <ftp://badary.iszf.irk.ru/data/prototype/png/>. На рисунке 4.4 показаны примеры

записей всплесков на пяти частотах. Три графика соответствуют временным профилям интегрального потока и суммарным потокам по низким и высоким пространственным частотам.

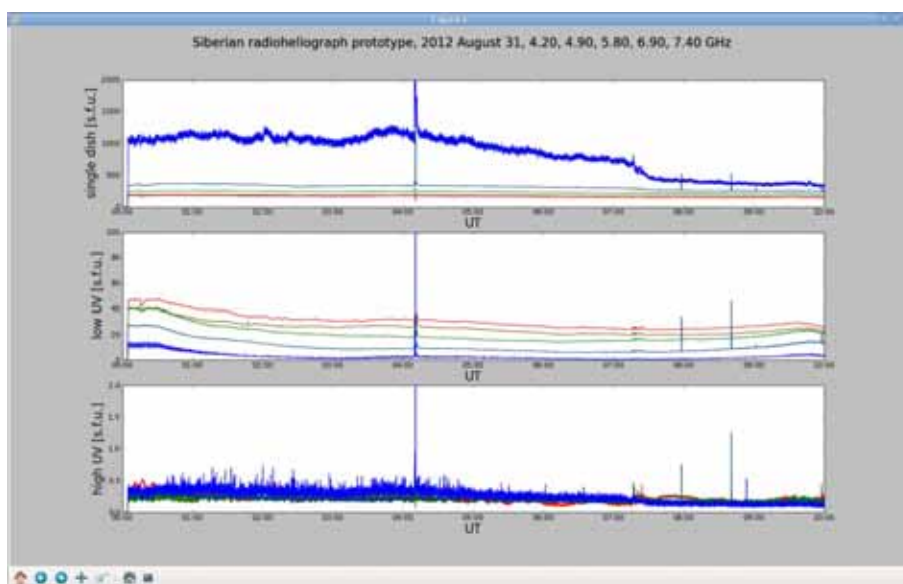


Рисунок 4.4. Пример представления полного дня наблюдений на 10-антенном интерферометре. Поблизости от 04:00 UT виден всплеск микроволнового излучения.

5 Исследование крупномасштабных магнитных полей, структуры солнечной хромосферы, параметров плазмы в солнечной короне. Обобщение и оценка полученных результатов

Целью НИР являлось:

Комплексные исследования солнечных явлений, основанные на наблюдениях в оптическом и радиодиапазонах структуры магнитных полей на уровне фотосферы и микроволновых источников в короне Солнца.

Разработка методик диагностики потоков нетепловых частиц в солнечных вспышках по спектральным особенностям микроволнового излучения и измерениям поляризации оптического излучения.

Развитие инструментария по диагностике солнечных явлений: разработка и изготовление диагностических монохроматических фильтров для многоволновой томографии солнечной атмосферы на БСВТ; оснащение его двухкамерным спектрографом и специализированным телескопом мониторинга крупномасштабных магнитных полей и полей скорости на Солнце; создание новых технологий измерений распределений радиояркости по диску.

5.1 Итоги НИР за 1-3 этапы

Ниже приведены научно-технические результаты выполнения 1-3 этапов НИР на УСУ БСВТ и УСУ ССРТ.

5.1.1 Результаты выполнения НИР УСУ БСВТ

При выполнении НИР на УСУ БСВТ были получены научно-технические результаты в разработках:

- методов и инструментария прецизионной спектрополяриметрии солнечных вспышек и других нестационарных процессов в солнечной атмосфере;
- методов и инструментария высокоточных измерений крупномасштабных магнитных полей на Солнце;
- методик и инструментария для анализа структуры хромосферы по ее двумерным изображениям.

Разработка методов и инструментария для спектральных наблюдений

Большой вакуумный солнечный телескоп обладает уникальными оптическими

характеристиками, позволяющими исследовать физические процессы в атмосфере Солнца с высоким пространственным, временным и спектральным разрешением. Высокое пространственное разрешение БСВТ может дать новую информацию по многим структурам, включая пятна, рвы (moat), точки тени, яркие мосты, бомбы Эллермана и поры. Характеристики телескопа и используемый для наблюдений комплекс спектрофотометрической и поляриметрической аппаратуры позволяет получать данные мирового уровня и выполнять исследования по поляризационной спектроскопии солнечных вспышек. Так по спектрополяриметрическим наблюдениям на БСВТ обнаружено наличие ударной линейной поляризации в солнечных вспышках, на основании чего доказано существование пучков энергичных частиц, периодически и кратковременно бомбардирующих хромосферу во время солнечных вспышек. Считалось, что вспышки возникают в хромосфере Солнца, но на основании радио и рентгеновских наблюдений обнаружено, что вспышки возникают в солнечной короне, где происходит процесс высвобождения энергии в результате пересоединения магнитных силовых линий над активной областью. Поэтому для понимания процесса вспышки по всей глубине солнечной атмосферы в настоящее время исследование вспышек носит многоволновой характер, т.е. сопоставляются рентгеновские, ультрафиолетовые, оптические, а также радионаблюдения, для чего используются как наземные телескопы, так и инструменты, установленные на космических аппаратах.

Вместе с тем, изменение внутренних хромосферных слоев по глубине во время вспышки возможно лишь при одновременном наблюдении нескольких хромосферных и фотосферных линий требуется одновременное наблюдение в нескольких длинах волн оптического или инфракрасного диапазона. По крайней мере нужно, чтобы две линии, образованные на разных уровнях солнечной атмосферы, наблюдались одновременно. Для этого необходимо было создать второе камерное зеркало, которое можно было бы свободно передвигать в фокальной плоскости в диапазоне 5 метров от первого камерного зеркала.

Регистрация нескольких спектральных линий одновременно обычно осуществляется при использовании многокамерного или эшелюного спектрографов. Основным препятствием к созданию многокамерного спектрографа на БСВТ явился остаточный хроматизм двухлинзового объектива, в результате чего не все спектральные линии находятся в фокусе одновременно. Объектив БСВТ ахроматизирован для линии H_{α} и H_{β} . Кроме того, линии, попадающие в интервал длин волн от 5200\AA до 6000\AA , могут экспонироваться одновременно, так как в этом интервале фокус меняется на 2-3мм, т.е. в пределах астигматической разности спектрографа. Был рассмотрен вариант спектрографа, дающий возможность регистрировать хотя бы две спектральные области одновременно. На рисунке 5.1 показана зависимость фокуса изображения на щели от длины

волны. Используя этот график, можно выбрать две линии, для которых фокусное расстояние одинаково.

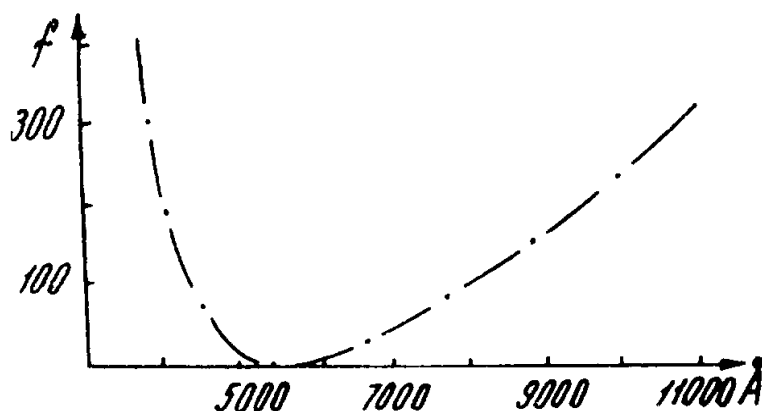
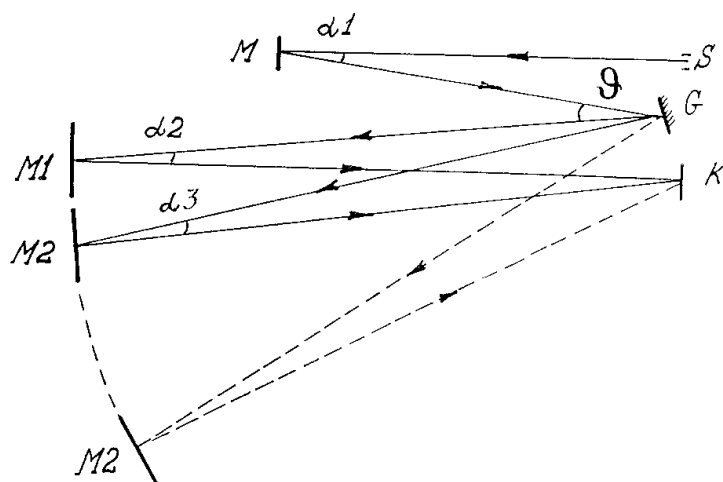


Рисунок 5.1 – Фокусное расстояние двухлинзового объектива в зависимости от длины волны.

Второе камерное сферическое зеркало было выполнено сотрудниками оптической группы института. Оно имеет те же габариты и установлено на том же фундаменте, что и первое. Фундамент под зеркала представляет собой сегмент с радиусом 15 м; центр круга находится в кассетной части. На этот фундамент были положены рельсы, по которым стало возможным перемещение второго камерного зеркала.

Очевидно, двухкамерный вариант спектрографа – наиболее приемлемое решение, поскольку оно вытекает из двух противоречивых соображений: с одной стороны, естественное стремление экспонировать несколько спектральных областей одновременно, с другой – из-за ахроматизма объектива возможно наблюдать одновременно лишь некоторые спектральные области. Кроме того, при спектро-поляризационных наблюдениях одновременно регистрируется 4 спектра, и трудно расположить еще больше спектров на одной ПЗС камере. Рабочая схема спектрографа показана на рисунке 5.2, а на рисунке 5.3 – фотография комнаты спектрографа с видом на коллиматор М и два камерных зеркала М1 и М2.



S-входная щель, М М1, М2 – зеркала, К –ПЗС-камера
Рисунок 5.2– Схема двухкамерного спектрографа



Рисунок 5.3 – Двухкамерный спектрограф.

Габаритные размеры оптики спектрографа теперь следующие:

Коллиматорное зеркало М	диаметр 283,5мм	фокусное расстояние 9,5м
Камерное зеркало М1	диаметр 598 мм	фокусное расстояние 14м
Камерное зеркало М2	диаметр 603мм	фокусное расстояние 14м
Установлена плоская решетка ГОИ размером 200x300 мм ² , 600 штр/мм		

Разработка методик и инструментария для анализа структуры хромосферы по ее двумерным изображениям

Для морфологических исследований тонкой структуры солнечной атмосферы необходимы двумерные изображения солнечных образований в «диагностических» линиях и полосах солнечного спектра, которые показывают структуру на различных высотах солнечной атмосферы (многоволновая томография).

Например, голубой континуум дает структуру в глубокой фотосфере, G-полоса и красный континуум происходят на несколько десятков километров выше. Линия Na возникает в очень спокойных областях, как верхняя фотосфера, но может также показывать фибриллы и пятнышки значительно выше вплоть до высот в много тысяч километров.

Для проведения томографических наблюдений Солнца на телескопе необходимы узкополосные фильтры большого размера со стабильными характеристиками. Использование фильтров на телескопах происходит, фактически, в открытых атмосферных условиях.

Технология изготовления фильтров должна обеспечить выполнение следующих требований.

1. Увеличение размеров фильтров требует применения средств, обеспечивающих превосходную однородность спектральных характеристик вдоль апертуры фильтра.

2. Фильтры используются в открытых условиях и требования к обеспечению продолжительности их времени жизни должно быть более строгие, чем к фильтрам, которые используются в закрытых условиях.

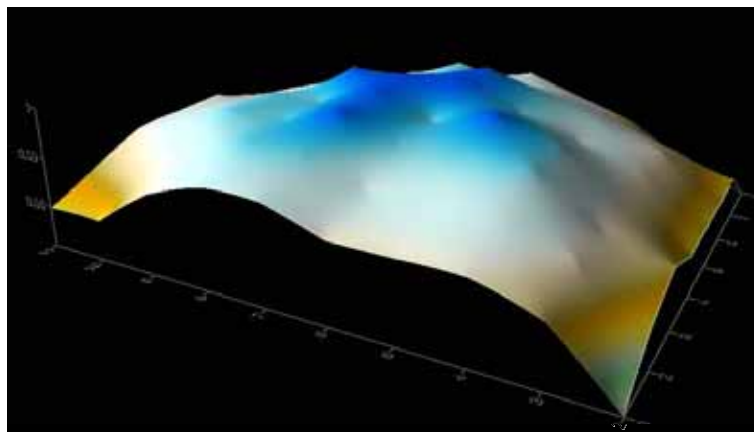
3. Полоса пропускания фильтров должна быть устойчива к влажной атмосфере.

4. Центральная длина волны пропускания фильтра не должна изменяться в пределах рабочих температур инструмента.

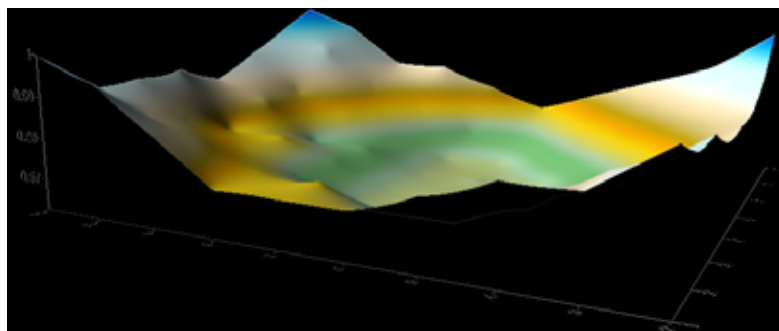
5. Для получения узкой полосы фильтра и контрастных изображений накладывается требование низкого поглощения и малого рассеяния в фильтре.

В последнее время появился новый метод – метод ионного распыления (ИР). Совместно с ассистированием ионным пучком чистого кислорода или его смеси с аргоном этот метод позволяет получить практически идеальные оптические пленки. Для изготовления узкополосных интерференционных фильтров (УПИФ) требуется очень высокая, порядка 0,005%, равномерность толщины пленок по поверхности подложки. Для того чтобы иметь возможность корректировать равномерность пленок по толщине, нужно иметь два положения подложки относительно системы ионный источник (ИИ)-мишень, при которых, в первом случае, толщина пленки в центре подложки больше, чем на краю, а во втором – меньше. Очевидно, что в этом случае равномерная

пленка будет получена в промежуточном положении (рисунок 5.4). Нами проводился поиск оптимальной геометрии установки путем изменения взаимного расположения ИИ-мишень-подложка. На макете, собранном в установке А700Q, исследована возможность получения однородных по толщине пленок. Найдено расположение ионный источник-мишень-подложка, при котором неоднородность не превышает 0,5%. При этом возможно улучшение однородности за счет перемещения системы ионный источник-мишень относительно подложки.



а)



б)

Рисунок 5.4 – Распределение толщины пленки по поверхности подложки:

а) расстояние край мишени - центр подложки 8.4 см. б) 4.5 см.

Найденное взаимное расположение источника и подложки и их перемещение, обеспечивающие равномерность нанесения пленок, послужило основой для разработки, конструирования и изготовления установки для нанесения тонкопленочных покрытий из окислов кремния и металлов методом ионного распыления с использованием ассистирующего источника ионов кислорода.

Блок-схема вакуумной установки представлена на рисунке 5.5, а конструкция вакуумной камеры показана на рисунке 5.6.

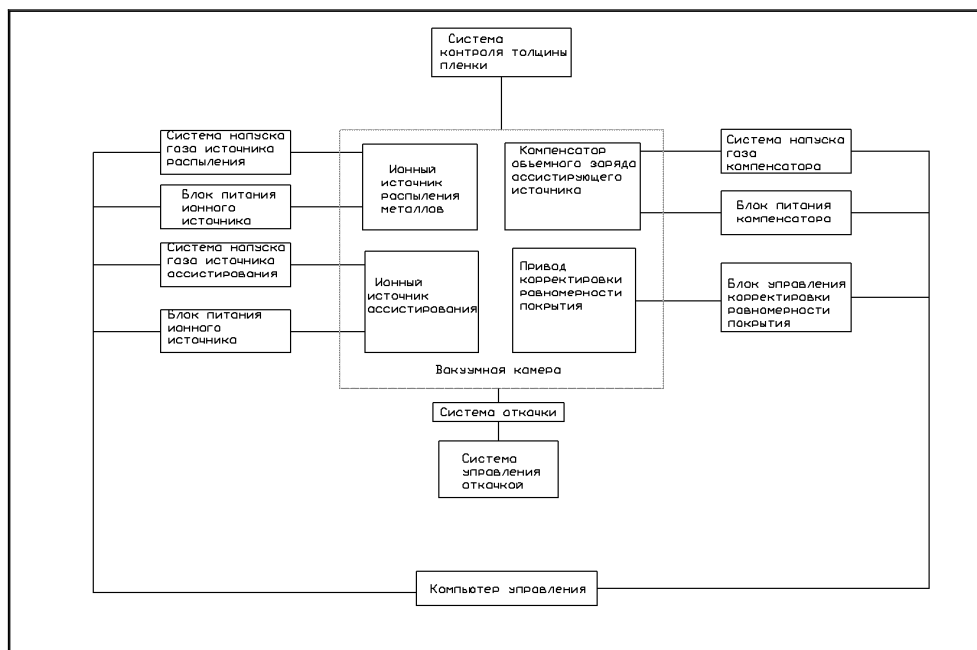


Рисунок 5.5 – Блок-схема установки для изготовления монокроматических фильтров.

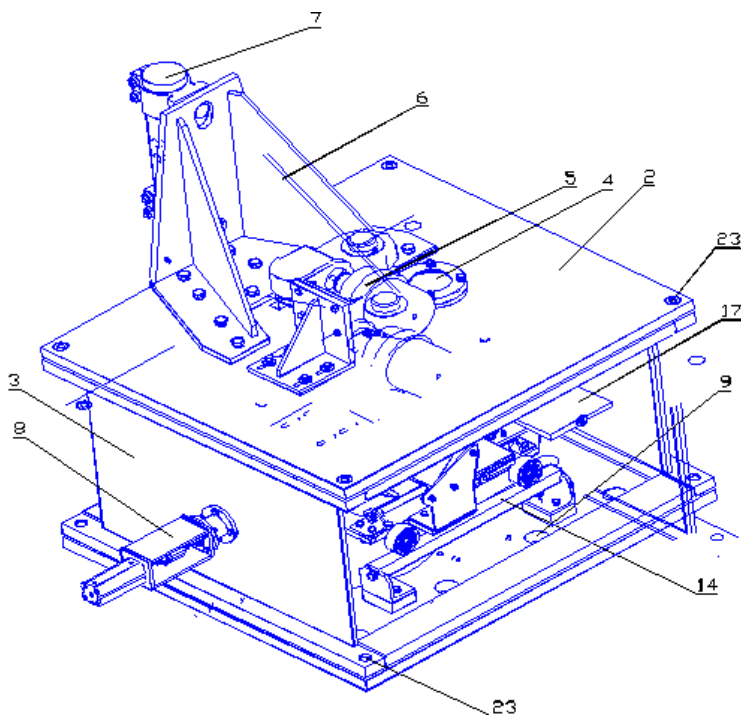


Рисунок 5.6 – Вакуумная камера - общий вид. Передняя стенка условно снята.

Сборка установки содержит систему обеспечения вакуума и системы для нанесения тонкопленочных покрытий: ионный источник распыления, ионный источник ассистирования и компенсатор пространственного заряда.

Ионный источник распыления направляет пучок ионов аргона с энергией порядка 1 кэВ на одну из мишеней (кремниевую или ниобиевую). Энергии ионов достаточно для выбивания из материала мишени нейтральных атомов, которые устремляются к подложке и оседают на нее. На подложку направлен также пучок ионов кислорода из ассистирующего источника. Ионы кислорода взаимодействуют с атомами осажденного вещества и образуют высший окисел стехиометрического состава. Помимо этого, энергии ассистирующих ионов (около 100 эВ) оказывается достаточно, чтобы произвести перераспыление адсорбированных атомов в поры растущей пленки, что полностью уничтожает пористость конденсата. Поскольку подложка, на которую наносится пленки, диэлектрик, необходимо принять меры против накопления положительного заряда на ее поверхности. Эту функцию выполняет источник электронов с полым катодом, который направляет в пучок ионов поток низкоэнергетических (порядка десятка эВ) электронов, компенсирующий заряд ионного пучка.

Проведены испытания ионного источника распыления. Диапазон энергии ионов аргона и ионный ток соответствует требованиям. Пространственное распределение плотности ионного потока позволяет получить однородные по толщине пленки пленки. Проверена электрическая прочность источника вплоть до 5 кВ. Проведены испытания ионного источника ассистирования. Энергия ионов кислорода и плотность ионного тока соответствуют условиям получения высокоплотных пленок с малыми световыми потерями и высокой стехиометрии высших окислов. Испытания источника электронов, обладающих малой энергией (менее 10 эВ.) показали, что величина тока (до 5 А) достаточна для компенсации объемного заряда потока ионов от ионного источника ассистирования. Графики зависимости вольт-амперных характеристик от расхода газа помогают выбрать режим работы ионных источников при известном значении энергии ионов и плотности ионного тока.

На рисунке 5.7 приведена фотография вакуумной установки для изготовления интерференционных монохроматических фильтров. Характеристики интерференционных фильтров для солнечной томографии на синий континуум λ 4520 Å, на красный континуум λ 6540Å и на G-полосу λ 4505Å. Полоса спектрального пропускания и спектральная однородность по полю фильтра λ 4520 Å исследованы на БСВТ и приведены в разделе 1 отчета.



Рисунок 5.7 – Установка для изготовления монохроматических фильтров.

Разработка методов и инструментария высокоточных измерений крупномасштабных магнитных полей на Солнце

Создание специализированного солнечного телескопа УСУ БСВТ для измерения магнитных полей имеют целью решение задач, связанных с относительно традиционным мониторингом крупномасштабного распределения солнечных магнитных полей по диску Солнца в течение нескольких лет, желательно на протяжении 11-летнего цикла активности, для изучения эволюции крупномасштабных магнитных полей и решение задач, ориентированных на изучение изменений в структуре крупномасштабного поля на короткой временной шкале от 10 мин. до 1 суток. Наблюдения с телескопом могут дать новые закономерности в эволюции магнитного поля, связанные с появлением солнечных пятен, с возникновением корональных выбросов массы и др.

В связи с этим разработан и создан солнечный специализированный телескоп нового поколения, который предназначен для измерения напряженности магнитного поля в солнечной фотосфере с пространственным разрешением от 10 угл. сек. до 2-3 угл. мин. с высокой чувствительностью. Основным достоинством нового телескопа является временное разрешение. Получение одной магнитограммы с пространственным разрешением 40 угл. сек. и чувствительностью порядка 0,1 Гс будет занимать несколько минут времени по сравнению с 2 часами наблюдений с существующим телескопом. Также солнечный телескоп нового поколения имеет возможность получать магнитограммы продольной компоненты поля и магнитограммы полного вектора напряженности магнитного поля по всему диску Солнца с временным разрешением 50 минут.

На 2 этапе НИР на основе технического задания и требований к работе систем управления разработана документация на специализированный солнечный телескоп для измерений

крупномасштабных полей УСУ БСВТ.

Блок-схема ССТ показана на рисунке 5.8. Двухзеркальный ЕНШ-целостат отбрасывает солнечный свет в горизонтальном направлении, освещая объектив телескопа. Диаметр объектива 42 мм и фокусное расстояние 500 мм. Объектив строит изображение Солнца диаметром ~ 5 мм на щели спектрографа. Отраженный от зеркальных щечек световой пучок с помощью объективов строит изображение щели и Солнца на координатной матрице Basler. Размер матрицы 1926x1082 пикселя. Размер пикселя 7,4 мкм, что соответствует 3,05 угл. сек. на изображении Солнца. Система из координатной матрицы, объектива и щели образует подсистему гидирования и сканирования изображения Солнца на щели спектрографа (ПГС). Ее детали механически связаны и не перемещаются за время сканирования Солнца. ПГС вычисляет координаты центра Солнца относительно щели спектрографа в инструментальной системе координат и формирует сигналы рассогласования для управления приводами зеркала склонения целостата, обеспечивая перемещение изображения Солнца в заданную позицию относительно щели.

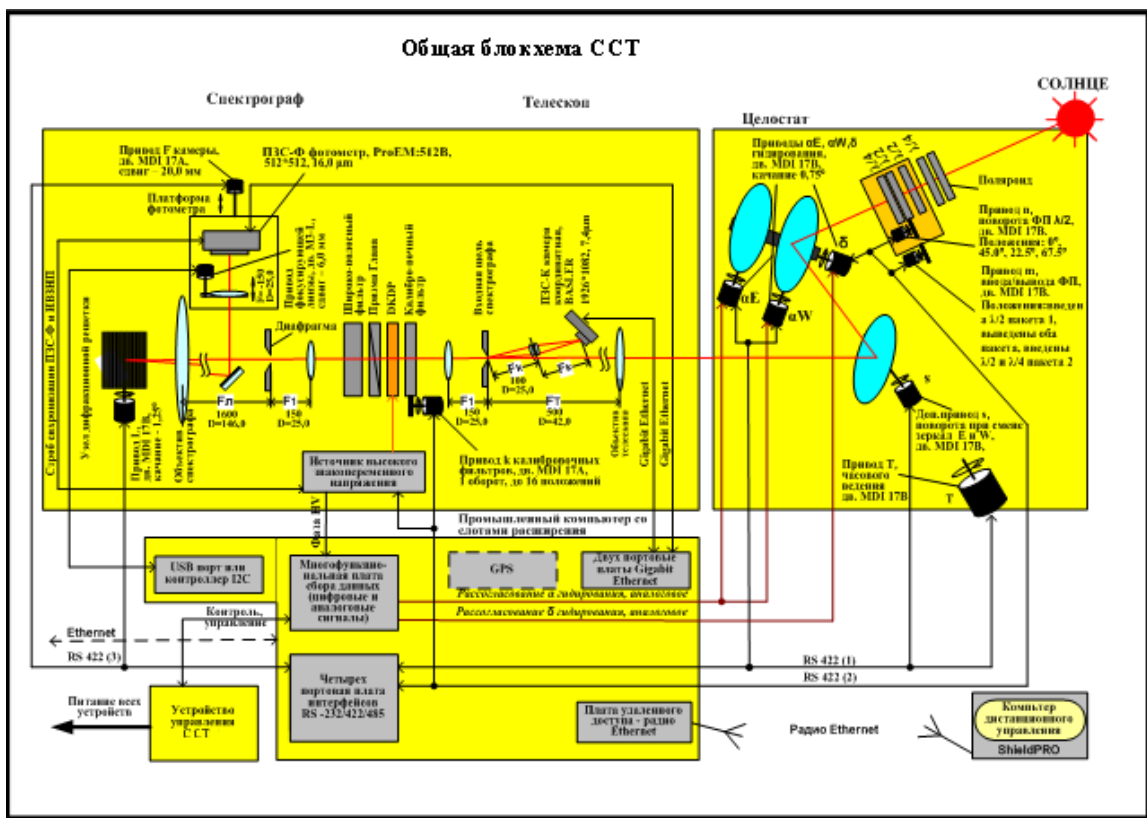


Рисунок 5.8 – Общая блок-схема специализированного телескопа.

При измерениях продольной составляющей вектора магнитного поля на Солнце используется эффект Зеемана. Основой измерений служит дифференцированный фотоэлектрический способ

регистрации амплитудно-модулированного света по контуру спектральной магниточувствительной линии. Анализ поляризованного света производится с помощью электрического кристалла DKDP и поляризатора, помещенных после входной щели спектрографа. В связи с использованием высокой щели с размером равным диаметру изображения Солнца и светосильным объективом телескопа ($F/D \approx 12$), анализатор поляризации помещен между двумя одинаковыми объективами. В этом случае угловая амплитуда световых пучков, параллельных от каждой точки щели, составляет около $0,5^\circ$, и обеспечивается эффективная работа кристалла DKDP для всего светового пучка.

Система из двух объективов перестраивает изображение щели в области диафрагмы и далее световой пучок падает на объектив спектрографа. Спектрограф имеет автоколлимационную схему Литтрова с дифракционной решеткой размером 300×200 мм с числом штрихов 300 на мм и углом блеска 66° в 9-10 порядках спектра. Диаметр объектива спектрографа равен 146 мм, фокусное расстояние 1600 мм. Линейная дисперсия спектрографа в области спектра 6302 \AA равна $0,58 \text{ \AA/мм}$. Изображение спектра через плоское диагональное зеркало строится на ПЗС-камере фотометра ProEM:S72B размером 512×512 пикселей, размер пикселя 16 \mu м . На каждом шаге сканирования изображения Солнца с камеры фотометра считывается изображение спектра в области спектральной линии, в которой производится измерение распределения кривой поляризации (V – параметра Стокса) по контуру линии

При проектировании солнечного телескопа учтены требования: раздельность фундаментов под оптико-механическую систему и модуль с куполом; жесткая, надежная связь фундаментов с основанием вне зависимости от характера грунта в месте установки телескопа; монолитность и массивность фундамента под оптико-механическую систему для максимального снижения влияния микровибраций приводов на качество изображения. Спроектированная форма купола имеет обтекаемую форму со светоотражающим покрытием и максимально защищает целостат от ветрового воздействия и солнечного нагрева.

Конструкция целостата обеспечивает его компактность, высокую точность ведения и непрерывность слежения без «перекладки» целостата при переходе наблюдений от восточной к западной стороне. Особое внимание уделено тому, чтобы конструкция обеспечивала расположение оси вращения в плоскости отражающей поверхности зеркала целостата.

Преимущество выбранной схемы ССТ – измерения магнитных полей с устранением влияния инструментальной поляризации, благодаря тому, что измерения проводятся дважды: без фазовой полуволновой пластинки и с пластинкой. Для этого в конструкции предусмотрен механизм быстрого ввода фазовой пластинки в траекторию светового пучка перед зеркалом телескопа.

В состав спроектированных автоматизированных систем телескопа вошли следующие

подсистемы:

- питающая оптика, включающая целостат, рефракторный объектив собственно телескопа, объектив системы сканирования и гидирования;

- спектрограф автоколлимационного типа, включающей узел входной щели, перестраиваемую оптику, дифракционную решетку, ломающее зеркало и широкополосные светофильтры;

- ПЗС- фотометр, включающий фоточувствительную матрицу;

- анализатор поляризованного излучения, включающий:

фазовые пластинки калибровочный поляризационный фильтр, призму Глана, электрооптический кристалл, которые установлены за входной щелью спектрографа; ПЗС-матрицу.

При разработке документации ССТ для обеспечения и сохранения метрологической точности в процессе предстоящей эксплуатации, ремонта и модернизации в состав телескопа вошли средства и оборудование по возможности стандартные, промышленного изготовления.

На 3 этапе НИР изготовлены оптико-механические узлы телескопа, его купол и выполнен монтаж телескопа в павильоне.

На рисунке 5.9 показана следящая система телескопа. Целостатная установка предназначена для освещения неподвижного объектива телескопа пучком солнечного света, обеспечения тонкого гидирования и координатных измерений изображения Солнца. В конструкции реализована схема с расположением, как дополнительного, так и главного зеркал целостата на часовой оси одной общей монтировки. Схема дополнена вторым главным зеркалом (вместо противовеса) для обеспечения оперативности перестройки инструмента в положения «восток-запад», безопасности и надежности в процессе эксплуатации.

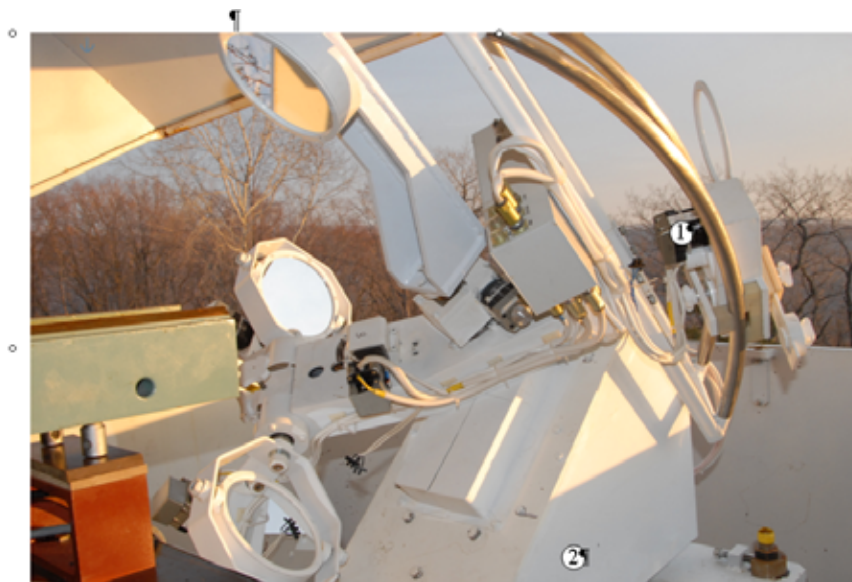


Рисунок 5.9 – Солнечный телескоп. 1 – механический модулятор, 2 – целостатная установка.

В блоке координатометра (рисунок 5.10) конструктивно объединено несколько узлов телескопа на общей кремальере. Блок предназначен для построения объективом телескопа сфокусированного изображения Солнца на входной щели спектрографа и построения изображения входной щели вместе с изображением Солнца в плоскости измерительной ПЗС-матрицы с помощью перестраиваемой оптики. Узлы электрооптического модулятора поляризации входного излучения расположены вблизи изображения входного окна телескопа между перестраивающими объективами.

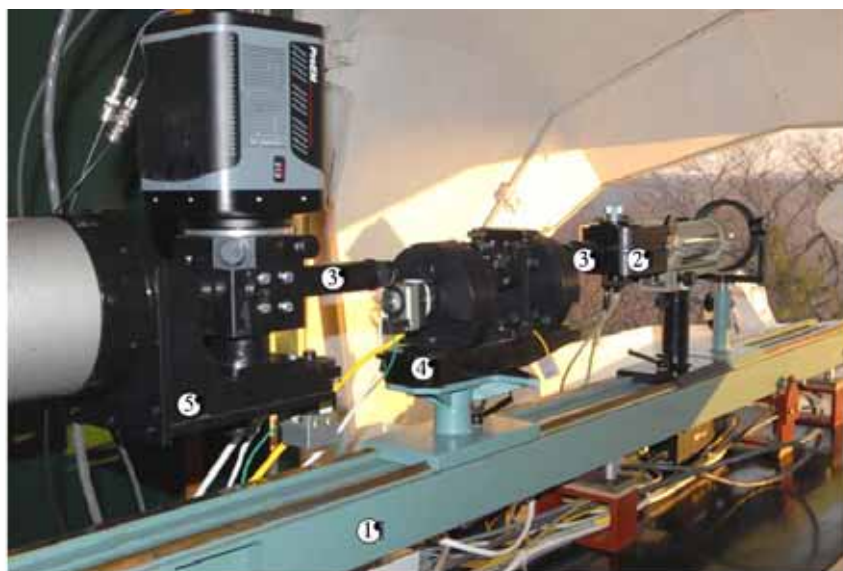


Рисунок 5.10 – Солнечный телескоп. 1 – станина, 2 – блок координатометра, 3 – перестраивающая оптика, 4 – узел электрооптического анализатора, 5 – узел спектрофотометра.

Спектрограф телескопа (рисунок 5.11) собран по автоколлимационной схеме с использованием стандартного автоколлиматора ОСК-2ЦЛ



Рисунок 5.11– Узел автоколлиматора спектрографа -1, узел дифракционной решетки – 2.

Узел дифракционной решетки предназначен для крепления ее оптической оси спектрографа, юстировки, ее вращения вокруг вертикальной оси, для защиты спектрографа от засветки и изоляции от внешней среды. В фокальной плоскости спектрографа установлена ПЗС-камера, регистрирующая спектры, модулированные по поляризации.

На рисунке 5.12 запечатлен момент настройки телескопа с участием д-ра Беккера (США).



Рисунок 5.12 – Настройка телескопа.

5.1.2 Результаты выполнения НИР УСУ ССРТ

Цифровой широкополосный коррелятор ССРТ

До последнего времени основным приемным устройством УСУ ССРТ являлся акусто-оптический приемник, сменивший в конце 90-х годов многоканальное приемное устройство на транзисторах и фильтрах. При таких преимуществах, как многоканальность и простота, он обладает такими недостатками, как относительно узкий динамический диапазон, нелинейность и нестабильность разноса принимаемых частот, подвержен влиянию амплитуды на фазу сигналов.

Задача по измерению спектра мощности сигнала, или взаимного спектра мощности двух сигналов является одной из основных для приемных устройств, используемых в радиоастрономии. С развитием цифровых методов обработки сигналов измерение спектра мощности корреляционным способом становится всё более привлекательным, т.к. при этом достигается максимальное перекрытие выборок анализируемого сигнала, а значит и максимальная чувствительность. Наиболее подходящим для этой задачи является реализация на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), которые сочетают в себе легкую конфигурируемость – гибкость и высокую скорость обработки данных.

В цифровом корреляционном приемнике сохранен проектный метод ССРТ получения двумерных изображений: использование синфазно-противофазной модуляции. Для реализации этого метода одновременно измеряется автокорреляция суммы и разности плечей ВЗ и СЮ, соответствующие спектры мощности, полученные программно, записываются в выходной файл в том же формате, что используется для хранения данных ССРТ. Это позволяет использовать существующее программное обеспечение ССРТ для обработки данных цифрового корреляционного приемника. Одной из главных причин разработки цифрового корреляционного приемника для ССРТ, наряду с высокой стабильностью цифровых устройств, является отсутствие у такого приемника паразитной амплитудной модуляции связанной с реализацией синфазно-противофазной модуляции. Традиционные фазовые модуляторы, используемые на ССРТ, представляют собой волноводные устройства. Точность изготовления таких устройств недостаточна для того, чтобы полностью скомпенсировать амплитудные искажения сигналов при изменении их фазы. При условии, что полезный сигнал от диска спокойного Солнца составляет лишь около 1% от полных сигналов на выходе волноводного тракта ССРТ, уровень паразитной амплитудной модуляции сравним с откликом от диска Солнца. Цифровой корреляционный приемник свободен от паразитной амплитудной модуляции, так как изменение фазы происходит после оцифровки сигналов.

Таблица 5.1 – Основные характеристики анализатора спектра мощности

Эффективное число каналов	210
f_{\min} , МГц	5643
f_{\max} , МГц	5779
Δf , МГц	136
$f_n - f_{n-1}$, МГц	0,53
Динамич. диапазон, Дб	15
Временное разрешение, сек	0,5

Предложенная методика демультимплексирования входных данных позволяет в разы увеличить полосу обрабатываемого сигнала, выходить за пределы одного чипа, тем самым наращивать число спектральных каналов (в соответствии с таблицей 5.1).

Разработанный цифровой корреляционный приемник может использоваться в любых задачах для измерения спектра мощности в реальном времени в полосе частот до 135 МГц с максимальным числом частотных каналов 420. Данные параметры могут варьироваться в зависимости от предъявляемых требований изменением прошивки модуля коррелятора, таким образом, увеличивая полосу, мы уменьшаем число каналов и наоборот. В дальнейшем для сбора корреляционных данных планируется использование протокола PCI-e, что позволит улучшить временное разрешение анализатора.

Ежедневные наблюдения на УСУ ССРТ

При выполнении Контракта был продолжен регулярный, с 1985 года, ряд наблюдений атмосферы Солнца на ССРТ. Наблюдения на ССРТ проводятся по гибкому расписанию, зависящему от времени года – склонения Солнца. Летом интервал ежедневных наблюдений 00-10 UT, зимой 02-08 UT. Это вызвано тем, что при отрицательных склонениях диаграмма направленности ССРТ на интервалах времени от кульминации больше трех часов серьезно уширяется и качество изображений падает. Потери наблюдательного времени были вызваны только отключениями электропитания и повреждением управляющей системы электромагнитными наводками от разряда молнии. В процентном отношении потери наблюдательного времени не превысили нескольких процентов. Двумерные распределения радиояркости диска Солнца и его окрестности на расстояние не менее радиуса измерялись каждые 2-3 минуты на частоте около 5.7 ГГц в интенсивности и круговой поляризации. Пространственное разрешение радиокарт менялось

с изменением высоты Солнца в течение дня, достигая минимального значения 22 угловых секунд около 5 UT. Ежедневно, радиокарты, полученные в это время, представляются на странице <http://badary.iszf.irk.ru/> (рисунок 5.13). Для удобства пользователей на сайте введена возможность выведения изображений диска Солнца в интенсивности и круговой поляризации по запросу, начиная с 2006 года по настоящее время.

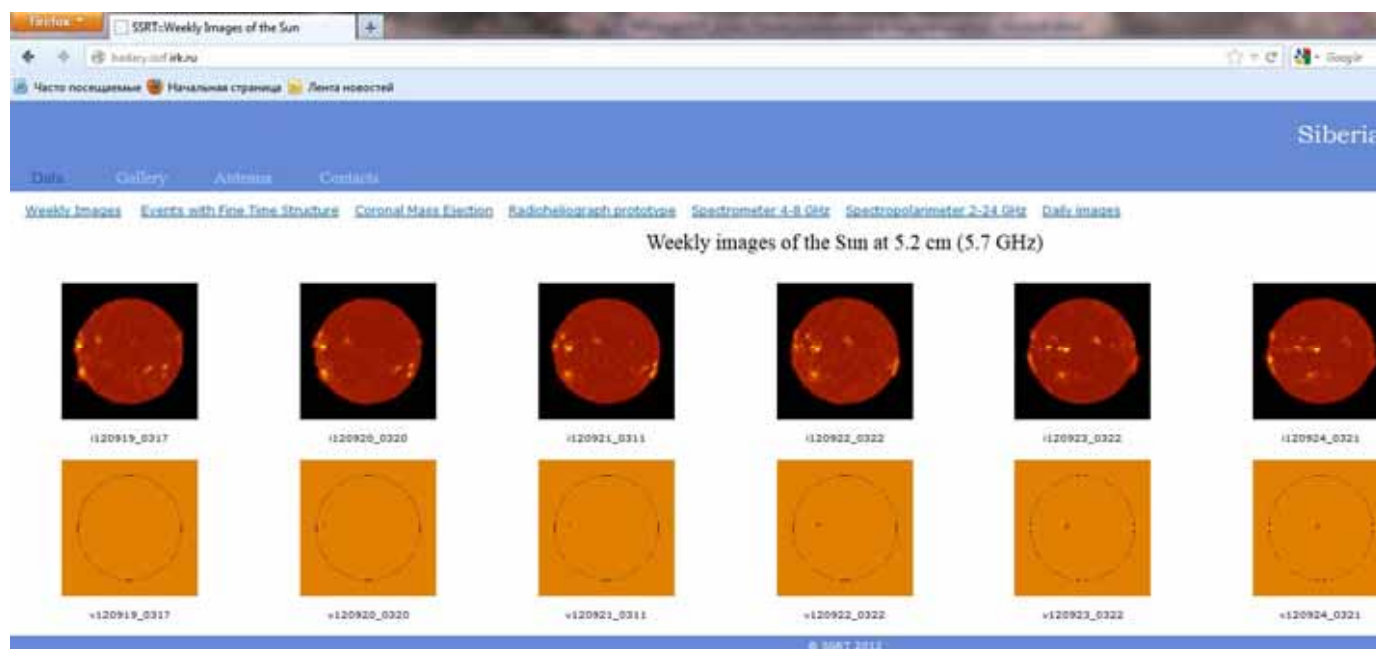


Рисунок 5.13– Представление данных УСУ ССРТ на странице <http://badary.iszf.irk.ru/>. Верхний ряд - радиокарты с 19 сентября по 25 сентября 2012 года в интенсивности на частоте 5.7 ГГц, нижний ряд – в круговой поляризации. Выше приведены гиперссылки на данные 10-антенного прототипа, спектрополяриметров 4-8 ГГц и 2-24 ГГц.

За время выполнения контракта был зарегистрирован ряд солнечных вспышек, включая мощную рентгеновского класса X2.2 вспышку 15 февраля 2011. Уникальными являются данные УСУ ССРТ по наблюдению микроволновых источников когерентного излучения, сочетающих высокое спектральное и временное разрешение. Каталог таких событий с графиками временного хода на ССРТ и динамическим спектрами в диапазоне 4 - 8 ГГц приведен по адресу <http://badary.iszf.irk.ru/Ftevents.php> (рисунок 5.14). В течение 2011 - 2012 гг. зарегистрировано более 70-ти событий с тонкой спектральной и временной структурой. Несомненный интерес представляют наблюдения динамики движения выбросов корональной массы. Наиболее интересное событие наблюдалось 23 июня 2012 г. (см., <http://badary.iszf.irk.ru/eruption.php>).

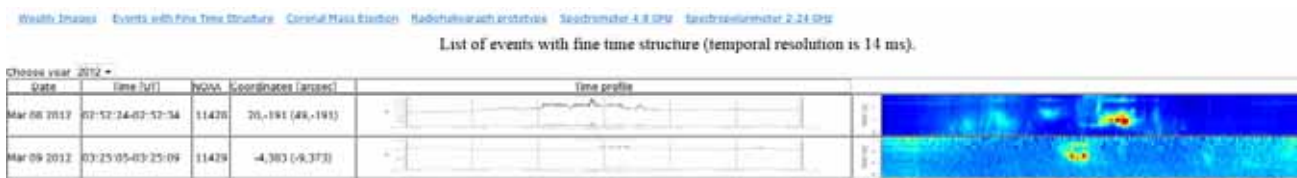


Рисунок 5.14 – Пример Каталога событий с субсекундными импульсами излучения в диапазоне частот около частоты приема ССРТ.

С целью всепогодного мониторинга выбросов корональной массы наземными средствами в последнее время развернута глобальная сеть радиометров метрового диапазона «Каллисто». Одним из инструментов сети является спектрометр 50-1000 МГц, входящий в комплекс инструментов УСУ ССРТ. Пример записи всплеска с помощью сети «Каллисто» показан на рисунке 5.15.

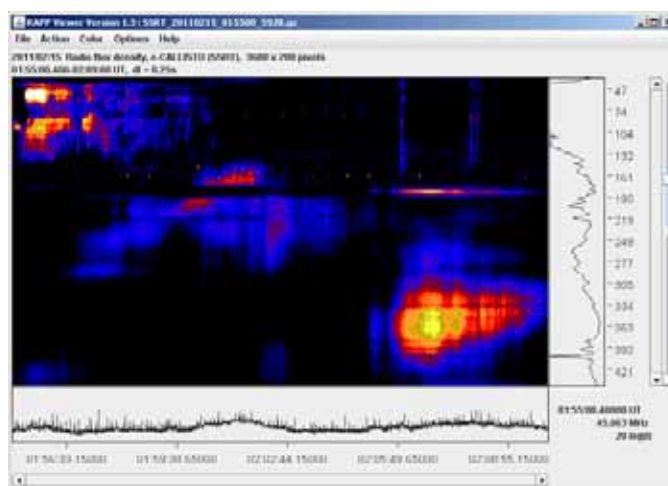


Рисунок 5.15 – Динамический спектр метрового всплеска, записанного на УСУ ССРТ во время мощной вспышки 15 февраля 2011 года.

Разработка методов наблюдений источников микроволнового излучения на диске Солнца, сочетающих высокое временное, пространственное и спектральное разрешение

Современные наблюдения должны сочетать высокое временное, пространственное и спектральное разрешение. Временное разрешение должно быть достаточным для регистрации элементарных импульсов энерговыделения субсекундной длительности. Пространственное разрешение должно обеспечивать выделение на изображениях полного диска Солнца основных элементов короны активных областей – магнитных петель с размерами порядка несколько угловых секунд. Спектральное разрешение необходимо для идентификации механизма излучения и выделения особенностей в спектре, связанных с собственными колебаниями замагниченной плазмы источника.

В частности, для интерпретации импульсов, зарегистрированных ССРТ на частоте 5.7 ГГц,

необходимы измерения динамического спектра с достаточно высоким временным и пространственным разрешением. В 2011 году были начаты регулярные наблюдения в диапазоне частот 4 – 8 ГГц на 26-канальном спектрополяриметре с временным разрешением 11 мс. На рисунке 5.16 приведены временные профили и динамические спектры. Видно, что отдельным импульсам на частоте приема ССРТ соответствуют узкополосные дрейфующие всплески.

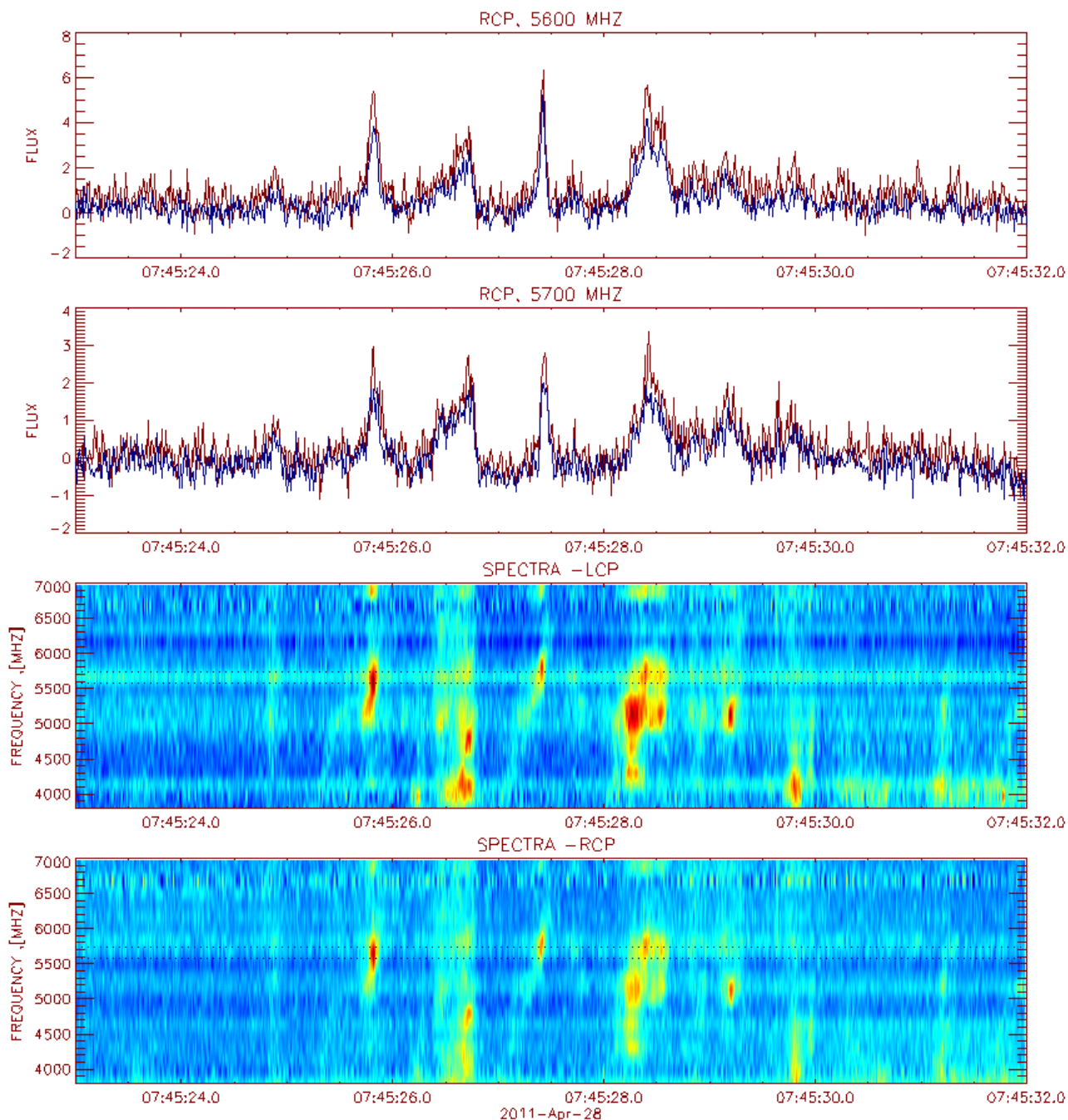


Рисунок 5.16 – Временные профили на нескольких частотных каналах (вверху) и динамические спектры в разных поляризациях (внизу). Горизонтальные пунктирные линии ограничивают полосу приема ССРТ, в которой возможны измерения размеров и положения источников на диске Солнца.

Наблюдения вспышечных источников 10-антенным интерферометром

Ниже приведены результаты разработок по использованию многоволновых наблюдений микроволновых источников 10-антенным интерферометром, доложенные на 13 Европейской конференции по физике Солнца и опубликованные в специальном выпуске международного журнала *Solar Physics* [1]. Показано, что даже относительно небольшое количество антенн позволяет получать информацию о положении центра яркости этих источников и их характерных размерах, если источники достаточно малы. Информация об этих параметрах, измеренных на нескольких частотах одновременно важна для исследований солнечных вспышек.

Для оценки размеров источников можно воспользоваться следующим соображением. Источники, возникающие во время вспышек достаточно компактны по сравнению с шириной диаграммы направленности, поэтому можно пренебречь двумерными особенностями пространственного спектра источника и аппроксимировать данные 10-антенного макета как одномерные (рисунок 5.17).

Для оценки смещения центра яркости можно использовать изменения фаз пространственных гармоник минимальных баз макета. С учетом знания углов между векторами баз и осями экваториальной системы координат можно получить смещения центров яркости в полосе частот (рисунок 5.18). Результат представлен на рисунке 5.19. Здесь проведено сравнение размеров источников, полученных ССРТ и оценок размеров и смещений центров яркости, полученных на макете радиогелиографа. Контурными линиями даны изображения ССРТ на частоте 5.7 ГГц, трехмерные изображения показывают размеры и смещения (оси X, Y) в полосе частот (ось Z).

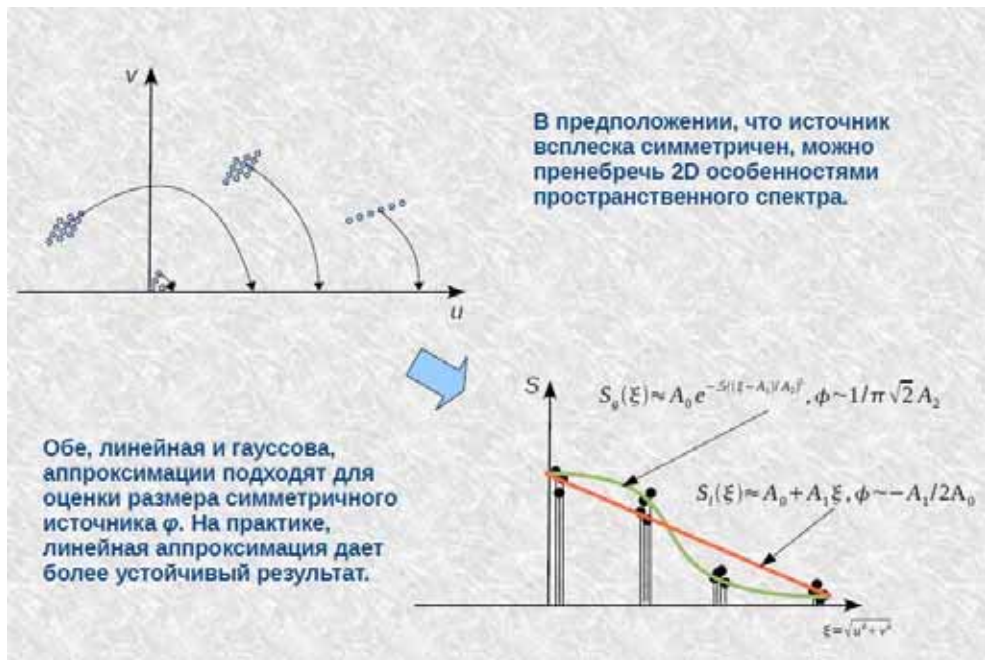


Рисунок 5.17 – Приведение двумерного пространственного спектра к одномерному с последующей аппроксимацией для оценки размеров источников.

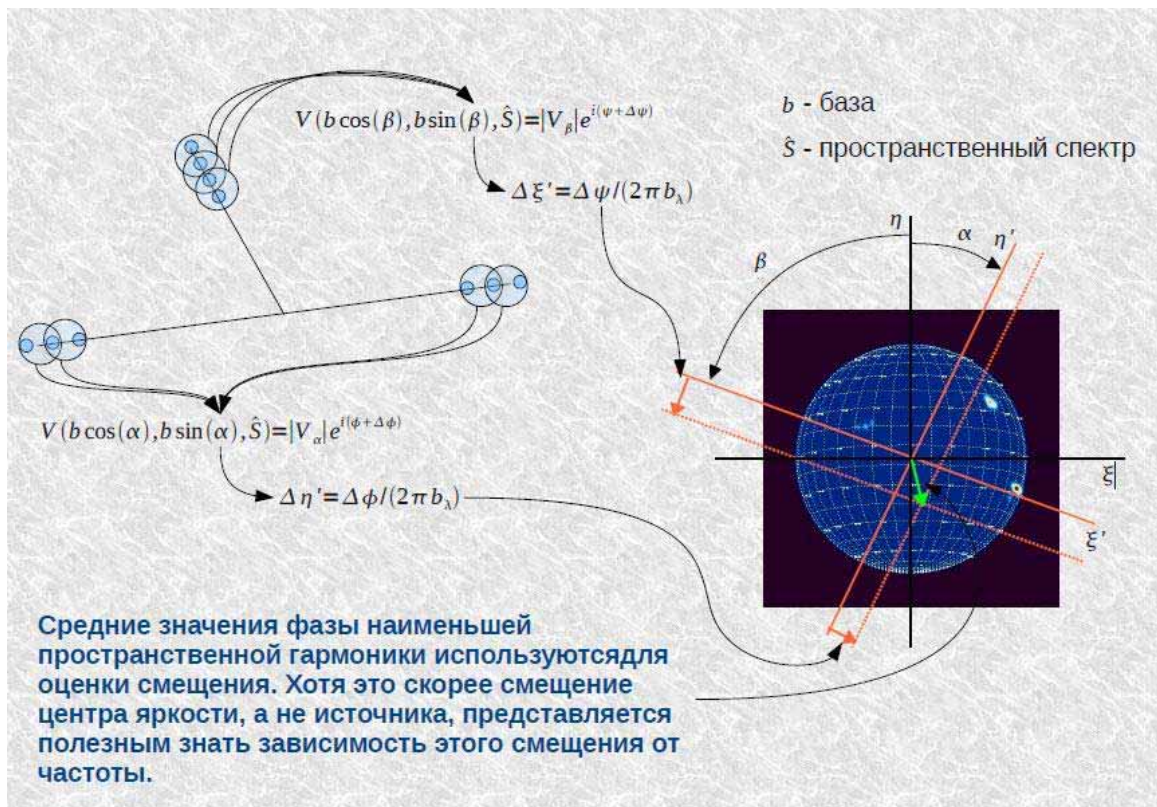


Рисунок 5.18 – Оценка смещения центра яркости по изменениям фаз пространственных гармоник.

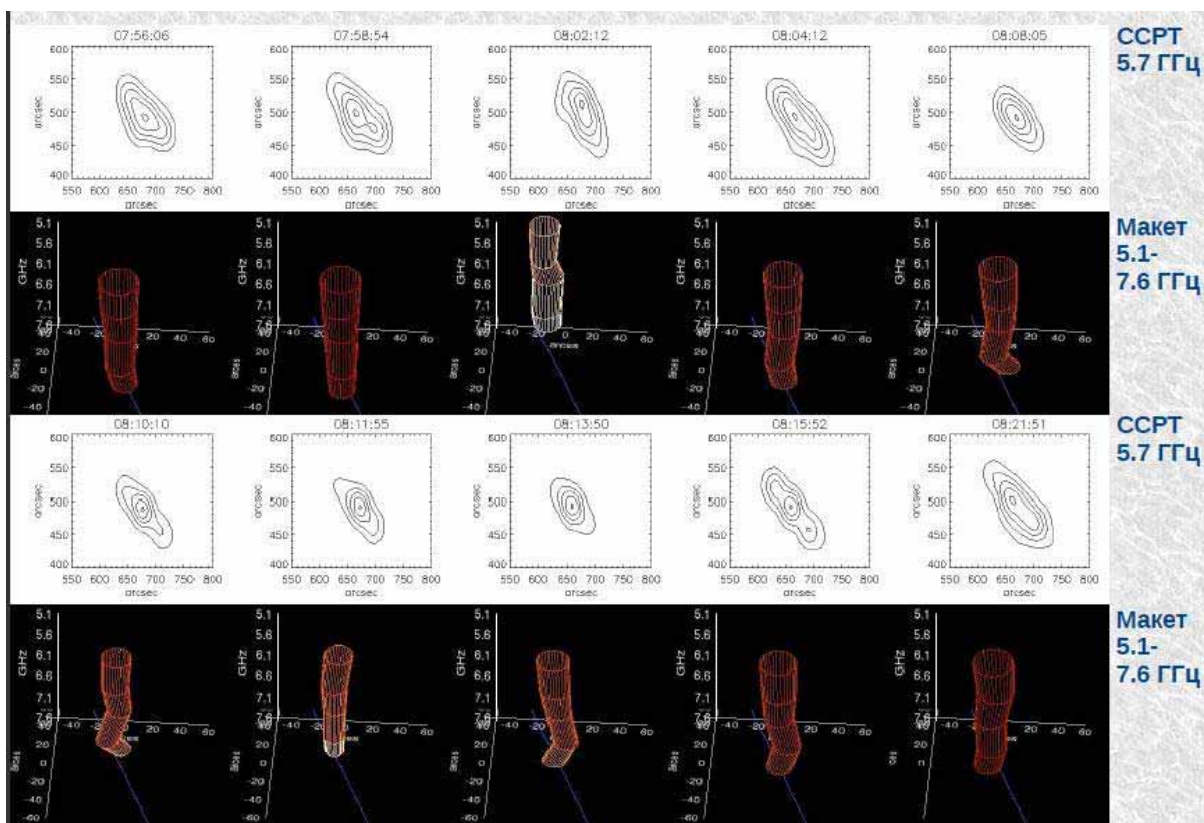


Рисунок 5.19 – Результат анализа многоволновых наблюдений. Контурными показаны данные ССРТ на частоте 5.7 ГГц, трехмерная картинка показывает оценки размеров и смещений центров яркости в полосе частот макета радиогелиографа.

Во время выполнения Контракта проводились регулярные тестовые наблюдения на 10-антенном макете многоволнового радиогелиографа. Наблюдения проводились одновременно на пяти частотах (5.1, 5.5, 6.3, 6.9 и 7.6 ГГц). Данные об интенсивности принимаемого излучения, корреляции сигналов антенн на ближних и дальних базах приводятся в непрерывном режиме на странице http://badary.iszf.irk.ru/prototype_10.php. Результаты тестовых исследований и наблюдений ряда вспышек опубликованы в работах [1,2]. Представлен ряд докладов на 13-ю Европейскую конференцию по физике Солнца (13th European Solar Physics Meeting (ESPM-13) Rhodes, Greece, September 12-16, 2011). На рисунке 5.20 приведен пример анализа положений центроидов яркости источников на различных частотах во время вспышки 7 марта 2011 г.

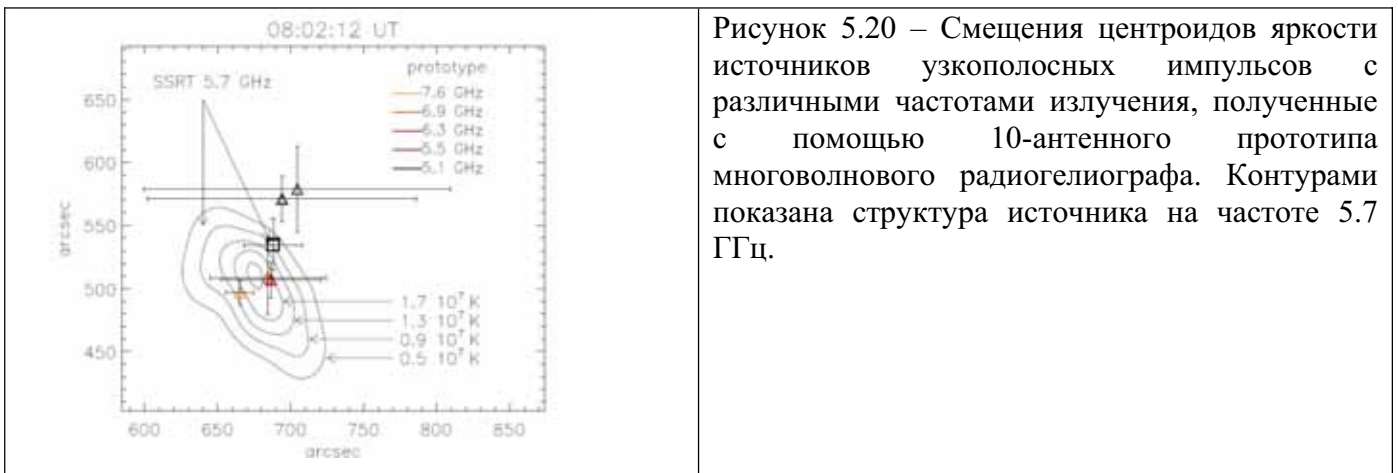


Рисунок 5.20 – Смещения центроидов яркости источников узкополосных импульсов с различными частотами излучения, полученные с помощью 10-антенного прототипа многоволнового радиогелиографа. Контурами показана структура источника на частоте 5.7 ГГц.

Проведение исследований эруптивных процессов солнечной активности с использованием данных УСУ ССРТ

Интересные результаты были получены с помощью данных УСУ ССРТ при анализе серий субсекундных всплесков, зарегистрированных во время солнечных вспышек [3]. Радиоизлучение позволяет исследовать потоки ускоренных электронов в области ускорения и на пути их распространения. Основные результаты о распространении электронных потоков были получены при изучении дрейфующих всплесков так называемого III типа, которые проявляются как узкополосные всплески, частота которых или быстро увеличивается, или уменьшается со временем. Установлено, что частота излучения всплесков III типа равна местной плазменной частоте, которая пропорциональна квадратному корню из плазменной плотности. Появление дрейфов с уменьшением частоты объясняется уменьшением плотности плазмы при распространении электронных пучков от солнечной поверхности, а увеличение частоты со временем будет соответствовать движению пучков вниз, к поверхности Солнца.

Для излучения на рабочей частоте ССРТ 5.7 ГГц плотность плазмы в источнике должна превышать 10^{11} cm^{-3} , а масштаб изменения плотности на границе между плотным источником и разреженной окружающей плазмой не должен превышать несколько сотен километров. Эта оценка масштаба спада плотности плазмы не противоречит наблюдениям поперечных размеров ярких филаментов, наблюдаемым в ультрафиолетовом и рентгеновском излучениях. Наиболее благоприятные условия для выхода излучения реализуются для источников, расположенных в вершинах вспышечных петель. Действительно, в большинстве событий с субсекундными импульсами источники располагались около вершин петель.

На высоких частотах наблюдаются преимущественно положительные дрейфы, что естественно объясняется движением источника от вершины петли к ее основаниям. Однако,

наблюдения с пространственным разрешением определенного типа быстро дрейфующих всплесков, так называемых U-всплесков, показали, что дрейфы частоты могут быть вызваны не только перемещением источника по петле вдоль градиента плотности, но и изменением плотности со временем в неподвижном источнике эмиссии. Следовательно, для надежной интерпретации быстро дрейфующих всплесков необходимо различать эффекты изменения плотности плазмы во времени и пространстве.

Динамические спектры микроволновых всплесков были зарегистрированы Солнечным Широкополосным Радиоспектрометром (SBRS, 5.2 – 7.6 ГГц) в станции Hualou Национальной астрономической обсерватории Китая. Полоса пропускания канала SBRS составляет 20 МГц, и временное разрешение составляет 5 мс. Пространственные структуры были зарегистрированы одномерными линейками антенн УСУ ССРТ с временным разрешением 14 мс. Измерялись обе круговые поляризации. Временные профили субсекундных импульсов представляются на сайте ИСЗФ СО РАН: <http://www.ssrt.org.ru/> и <http://ssrt.iszf.irk.ru/fast/>.

Были отобраны события, в которых интерферометр ССРТ наблюдал область вспышки в двух старших порядках; таким образом, два 1D распределения радиояркости, записанные линейками антенн Север-Юг, были зарегистрированы одновременно в пределах двух интервалов частоты, сосредоточенных в окрестности частот 5.67 и 5.76 ГГц. Линейный интерферометр ВЗ сделал запись 1D изображения в окрестности частот 5.69 ГГц. Видимые размеры источников превышали истинные из-за рассеивания излучения в нижней короне. Точность измерений относительных смещений источников, зарегистрированных одновременно на двух различных частотах, была в пределах 2 секунд дуги.

На рисунке 5.21 показан пример быстро дрейфующего всплеска на динамическом спектре и временные профили интенсивности лево-поляризованного излучения и положений центроида яркости относительно фонового всплеска на двух частотах 5.67 и 5.76 ГГц. Положения вычислены автоматически для интервалов, когда быстро дрейфующий компонент потока превышает 10% интенсивности фонового всплеска. В этом примере потоки были достаточно большие в интервале, отмеченном вертикальными линиями. Видно, что центроид изображения 5.67 ГГц был смещен приблизительно на 3 угловых секунды.

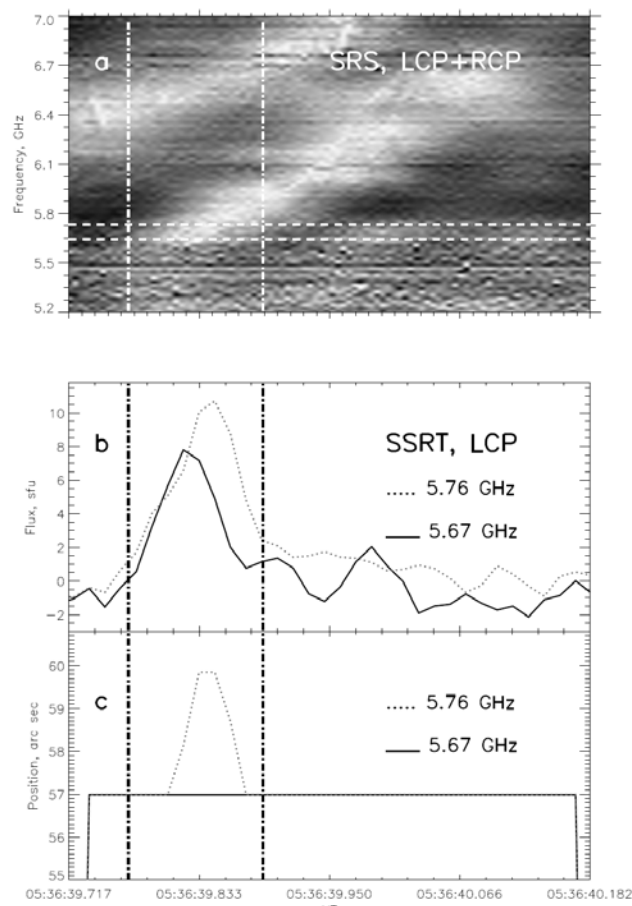


Рисунок 5.21. – 14 апреля 2002. Субсекундный импульс, зарегистрированный на двух частотах.

- а) Динамический спектр, 5.2 - 7.0 ГГц (SBRС). Горизонтальные пунктирные линии показывают полосу приема ССРТ. б) Временные профили на 5.76 ГГц (точечные линии) и 5.67 ГГц (сплошные). в) Положения субсекундных источников (точечные линии) на двух частотах ССРТ. Вертикальные пунктиры черты ограничивают интервал с субсекундным импульсом.

Одновременные наблюдения ССРТ на двух частотах дали уникальную возможность оценить градиент плотности плазмы и скорость излучателя независимо. Для каждого импульса было определено положение источника, а также их смещения и скорости частотного дрейфа.

Результаты измерений для серии импульсов во время вспышки 14 апреля 2001 года показаны на рисунке 5.22. Разброс скоростей дрейфа выглядит случайным вокруг среднего значения 3.6 ГГц/с кроме четырех импульсов. Было замечено, что пространственный разброс смещений Δl увеличивается со временем. Профиль плотности плазмы сглаживался вдоль петли со временем. Микроволновые изображения на 5.7 ГГц показывают петлю, вытянутую вдоль северо-западного направления. Отрицательно поляризованный источник (LCP) на 17 ГГц был расположен около

северного основания петли, наблюдавшейся в ультрафиолетовом излучении.

Видимые размеры субсекундных источников были сравнимы с шириной диаграммы ССРТ.

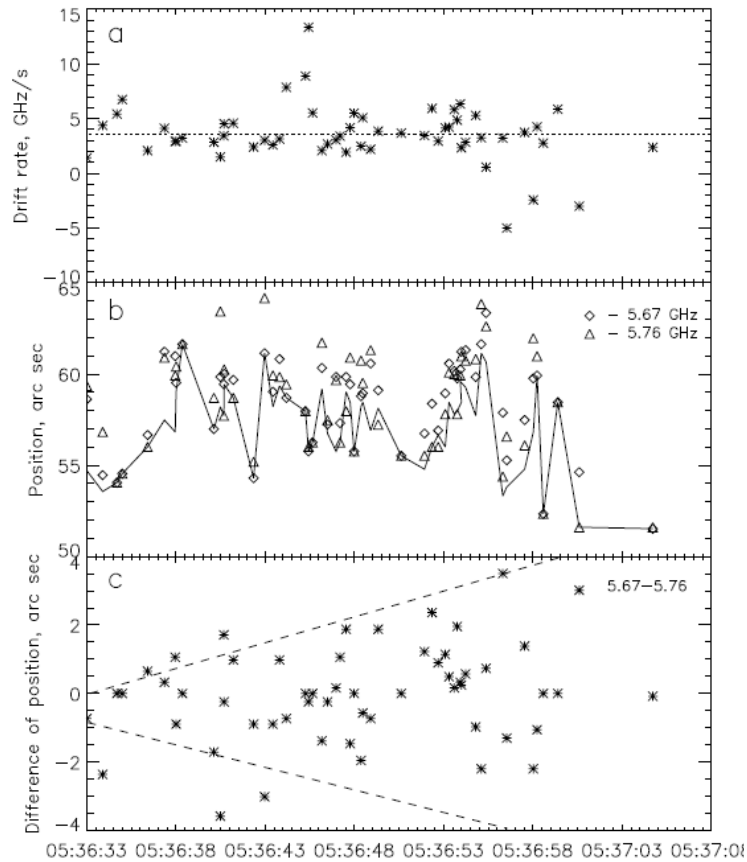


Рисунок 5.22. – а) Скорости частотного дрейфа (горизонтальный пунктир отмечает среднее значение); 1-d смещения импульсных источников б) на 5.67 ГГц (алмазы) и 5.76 ГГц (треугольники). Сплошная линия показывает смещения фонового всплеска; с) различия в положении источников излучения на двух частотах.

Наблюдаемые длительности субсекундных импульсов значительно превышают время релаксации кинетической энергии электронов, если их скорости равны скорости движения излучающего источника. Следовательно, угловое распределение излучающих электронов неизотропно и основная компонента скорости направлена поперек к магнитному полю.

Таким образом, наблюдения ССРТ одновременно на двух частотах (5.67 и 5.76 ГГц) позволяют различить пространственные и временные особенности источников всплесков. Показано, что источники излучения расположены внутри компактной плотной области около вершины петли. Размеры области ускорения не превышают нескольких мегаметров.

Разработка методов анализа многоволновых наблюдений источников микроволнового излучения

Довольно часто одновременные наблюдения солнечных вспышек в жестком рентгеновском и микроволновом излучении показывают высокое подобие временных профилей, указывающее на их общее происхождение. Можно предположить, что эти излучения генерируются одними и теми же популяциями нетепловых электронов. Однако при этом наблюдаются существенные различия в положениях рентгеновских и микроволновых источников, указывающие на их разницу по высоте во вспышечной петле.

Также отличаются формы электронных спектров, реконструированные по спектрам в жестком рентгеновском и микроволновом излучениях. Эти отличия указывают на важность эффектов распространения нетепловых частиц от вершины до основания вспышечной петли, по-разному проявляющихся в излучении электронов, вызванном разными механизмами. Как известно, микроволновое излучение генерируется гиротронным излучением высокоэнергичных электронов с энергиями от нескольких десятков кэВ до нескольких десятков МэВ, двигающихся по спирали вдоль магнитных силовых линий, в то время как рентгеновское излучение генерируется тормозным излучением этих же электронов на частицах вспышечной плазмы.

Распространение электронов пучка во вспышечной атмосфере описывается функцией распределения f , зависящей от времени, пространственной координаты, энергии и питч-угла частиц. Изменение этой функции со временем и глубиной описывается уравнением Ландау-Фоккер-Планка:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial t} + n\sqrt{E}\mu \frac{\partial f}{\partial s} - 2\varepsilon\mu\sqrt{E} \frac{\partial f}{\partial E} - \varepsilon \frac{1-\mu^2}{\sqrt{E}} \frac{\partial f}{\partial \mu} = \\ n \frac{1}{\sqrt{E}} \frac{\partial f}{\partial E} + n \frac{1}{2E^{3/2}} \frac{\partial}{\partial \mu} \left((1-\mu^2) \frac{\partial f}{\partial \mu} \right) - n \frac{(1-\mu^2)\sqrt{E}}{2} \frac{\partial \ln B}{\partial s} \frac{\partial f}{\partial \mu}, \end{aligned} \quad (1)$$

где E – энергия электронов, e - заряд электрона, m_e - масса электрона, μ - косинус питч-угла, ε - электрическое поле, индуцируемое пучком, B – магнитное поле.

Электрическое поле ε , наведенное пучком электронов, описывается выражением:

$$\varepsilon = \frac{j_{rc}(x)}{\sigma(x)} = \frac{j(x)}{\sigma(x)} = \frac{2\sqrt{2}\pi}{\sigma(x)} \frac{e}{\sqrt{m_e}} \int_0^\infty \int_{-1}^1 f(x, E, \theta) \sqrt{E} \cos \theta dE d\cos \theta, \quad (2)$$

где σ – классическая проводимость окружающей плазмы, j и j_{rc} – плотности тока, вызываемые потоками электронов, высыпаящихся вниз и возвращающихся обратно, θ - питч-угол электронов.

На рисунке 5.23 показаны изменения плотности нетепловых частиц с глубиной. Видно, что в короне при всех начальных плотностях пучка, как с учетом, так и без учета индуцированного электрического поля, плотность выше для пучков с более мягким спектром электронов. Это связано с тем, что питч-угловая диффузия намного сильнее проявляется для электронов меньших энергий. Если начальная плотность пучков велика, то обратные потоки нетепловых электронов дополнительно растут из-за индуцированного электрического поля, увеличивающего угол рассеяния электронов, вплоть до углов выше 90 градусов, когда они двигаются обратно. Поскольку потери энергии электронами в столкновениях значительно меньше для высокоэнергичных электронов, то жесткие пучки проникают на значительные глубины в хромосферу и даже в фотосферу.

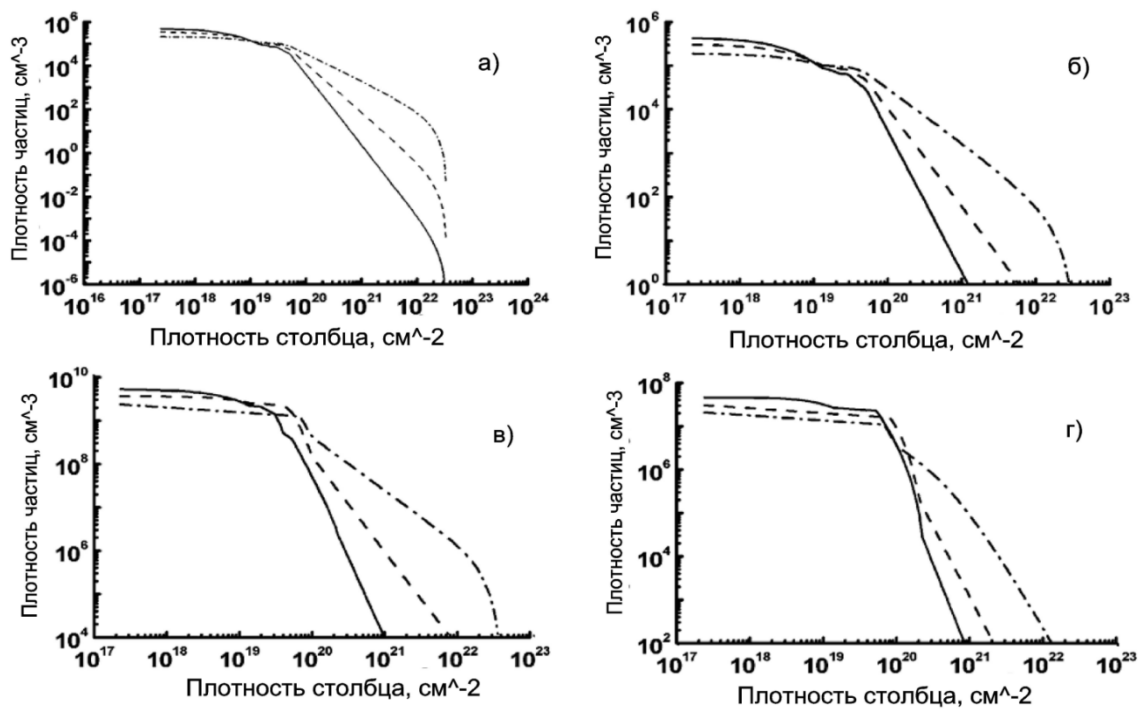


Рисунок 5.23 – Вариации плотности частиц пучка с глубиной: (а) без электрического поля для начальной энергии потока 10^{10} эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (б) с индуцированным электрическим полем для начальных потоков энергии 10^8 эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$; (в) 10^{10} и (г) 10^{12} и для начальных спектральных индексов: 7 (сплошная линия), 5 (штриховая линия), 3 (штрих-пунктирная линия).

Для электронов с энергиями до 100 кэВ, которые принадлежат пучку электронов с начальными потоками энергии выше 10^{11} эрг/см²/с, потери энергий на торможение в самоиндуцированном электрическом поле доминируют над потерями энергии на столкновениях на всех корональных глубинах столбца от (10^{17} см⁻²) до переходного слоя (3×10^{19} см⁻²). Другими словами, электрон с энергией до 100 кэВ скорее затормозится в короне электрическим полем и вернется

обратно к месту инъекции, чем теряет свою энергию в столкновениях, для которых корона является тонкой мишенью.

Включение омических потерь в дополнение к столкновениям и магнитной сходимости существенно меняет распределение электронов на глубинах от нижней короны до фотосферы, увеличивая число электронов, возвращающихся обратно в корону. Поскольку схождение магнитного поля приводит к отражению большого количества электронов назад к источнику, нагрев уменьшается на 70% по сравнению с распространением в постоянном магнитном поле. Очевидно, что вид распределения электронов в петле зависит от характеристик потерь, что, в свою очередь, влияет на спектры жесткого рентгеновского излучения.

Разработанные методы проверялись на примере вспышки 18 марта 2001 года. Были рассчитаны спектры фотонов для разных позиционных углов, под которым вспышечная петля наблюдалась с Земли [4,5]. Расчеты проводились для главного пика жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, наблюдаемого в 04:03:40 UT. Рентгеновское излучение моделировалось с учетом кулоновских столкновений (C), с добавлением отражения в сходящемся магнитном поле (C+B), омических потерь (C+E), омических потерь и сходящегося магнитного поля (C+E+B). При этом расчеты фотонного спектра производилось как для пучков различной направленности (вверх и вниз), так и их суммы.

Моделирование этой вспышки показало, что в короне большой поток электронов направлен вниз, в хромосферу, а в хромосфере наоборот, вверх в корону. Таким образом, в этом событии оба эффекта: отражение и омические потери, должны быть значительными. Наблюдаемый жесткий рентгеновский спектр наилучшим образом совпадает с рассчитанным для модели электронного пучка со столкновительными потерями энергии и потерями в электрическом поле (CE) с учетом 100% альbedo эффекта. Жесткий рентгеновский спектр обнаруживает заметное выполаживание при низких энергиях, что указывает на значительное влияние индуцированного электрического поля на потери энергии электронов.

Микроволновое излучение вычислялось в предположении однородного источника. Физические параметры фоновой плазмы (температура, плотность, скорости плазмы) были найдены моделированием нагрева плазмы, инжектированным электронным пучком длительностью 10 сек. Моделирование жесткого рентгеновского излучения выполнено, используя релятивистские поправки на площадь поперечного сечения.

Совместное действие индуцированного электрического поля и сходящегося магнитного поля приводит к значительному изменению зависимости интенсивности микроволнового излучения от глубины высыпания электронов, по сравнению с моделями, рассматривающими только

столкновения. Становится понятным, почему микроволновое излучение может значительно (на порядок) меняться по интенсивности в зависимости от ориентации петли относительно наблюдателя. Таким образом, учет индуцированного электрического поля важен как для интенсивности микроволнового излучения, так и формы его спектра и поляризации. Таким образом, в этом случае можно обеспечить более высокую корреляцию модельных расчетов с наблюдениями.

Используемые функции распределения электронов получены путем решения уравнения Фоккер-Планка. Начальный степенной индекс $\gamma = 3$, начальный поток энергии 10^{10} эрг см^{-2} с^{-1} . Различные линии соответствуют различным линейным плотностям, считая от места инъекции: сплошная линия: $\xi = 2.4 \times 10^{17}$ см^{-2} , пунктирная линия $\xi = 1.8 \times 10^{18}$ см^{-2} , штриховая линия $\xi = 5.5 \times 10^{18}$ см^{-2} , штрихпунктирная линия $\xi = 1.6 \times 10^{19}$ см^{-2} , три-пунктир-штриховая линия - $\xi = 5.0 \times 10^{19}$ см^{-2} .

Результаты расчета гиротронного излучения из корональной магнитной трубки (интегрированное по глубине) представлены на рисунке 5.24. Можно убедиться, что совместное влияние индуцированного электрического поля и сходящегося магнитного поля заметно усиливает (до порядка) интенсивность микроволнового излучения по сравнению с моделями, рассматривающими только столкновения, особенно при распространении пучков в глубоких слоях (вблизи оснований петли).

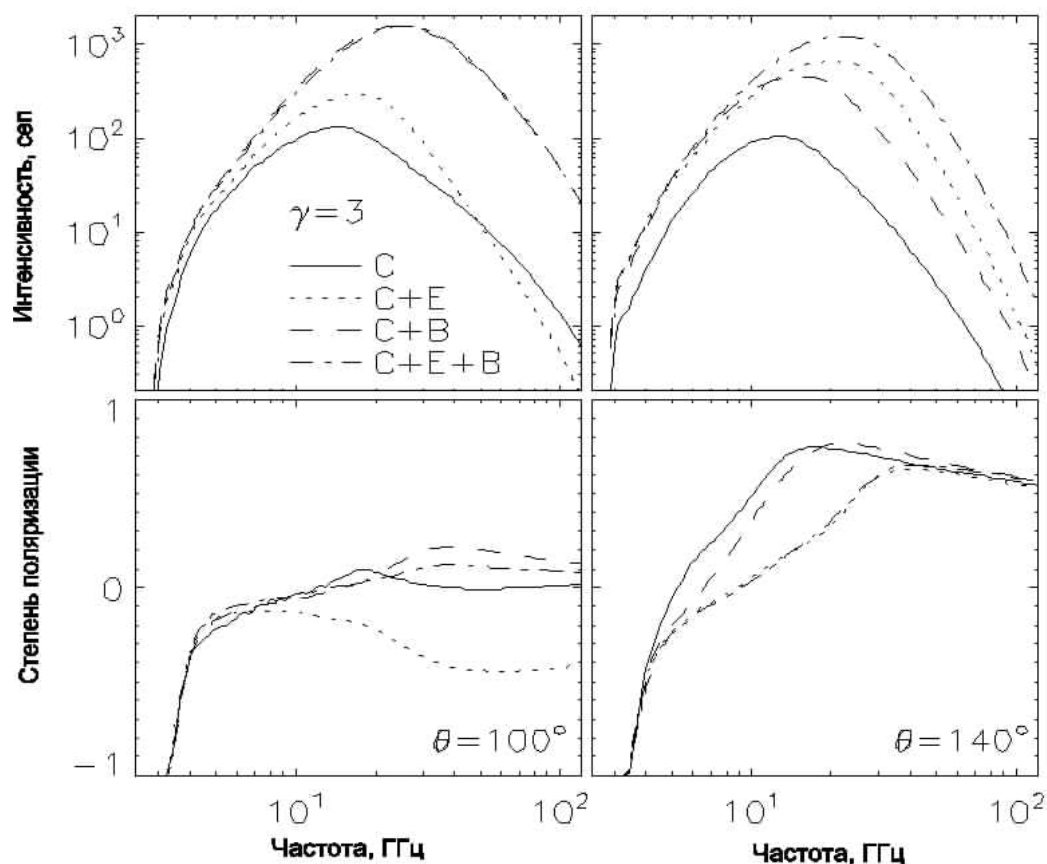


Рисунок 5.24 – Интенсивность и поляризация гиросинхротронного микроволнового излучения, рассчитанные для разных моделей и углов зрения.

Модели, учитывающие омические потери, в дополнение к столкновительным потерям и питч-угловому рассеянию, обусловленным электрическим и сходящимся магнитным полем, более точно описывают спектры жесткого рентгеновского излучения, наблюдаемые во вспышках, а также позволяют объяснить направленность жесткого рентгеновского излучения и его поляризацию. Более того, модели с индуцированным электрическим полем позволяют намного лучше описать спектры и поляризацию микроволнового излучения для тех же вспышек, в которых наблюдается сильная анизотропия излучения. Таким образом, учет омических потерь позволяет получать более надежные оценки параметров электронных пучков из совместных наблюдений жесткого рентгеновского и микроволнового излучения, по сравнению с чисто столкновительной моделью.

5.2 Обнаружение ударной поляризации линии $H\alpha$ во вспышках

На БСВТ проводятся спектро-поляриметрические наблюдения солнечных вспышек, по которым можно судить о роли пучков ускоренных частиц (протонов и электронов) в образовании вспышки на хромосферном уровне. При бомбардировке пучками частиц хромосферы во время вспышки, может происходить возбуждение и ионизация атомов водорода, что и приводит к образованию так называемой хромосферной вспышки. Но нагрев хромосферы может

осуществляться и теплопроводностью. Поэтому обнаружение ударной поляризации, которая возникает от воздействия пучков заряженных частиц, важно с точки зрения выяснения роли частиц. При исследовании ударной поляризации во вспышках чаще всего мы не обнаруживали свидетельств ударной линейной поляризации в линии H α . Только в некоторых случаях наблюдались кратковременные (десяtkи секунд), мелкомасштабные (2"- 4") участки с ненулевыми значениями параметров Стокса Q/I и U/I (2%-6%). Ориентация линейной поляризации в этих случаях обычно была радиальная, что говорит о низкой энергии электронов (ниже 200 эВ). В то же время в начале хромосферной вспышки (через 4 минуты после начала рентгеновской вспышки), поляризация имела как радиальное, так и тангенциальное направление с максимальным значением $P \approx 13\% - 14\%$ и появлялась в узлах с самопоглощением в центре линии H α . Появление центрального провала является вторым свидетельством воздействия потока ускоренных электронов на хромосферу во время вспышки. Кроме того, имеются и другие, менее важные свидетельства влияния пучков электронов на хромосферу во время вспышки: это кратковременность проявления обоих эффектов в центре линии H α (поляризации и сильного центрального самопоглощения), а также размеры области, где они происходят. Таким образом, наблюдаемая линейная поляризация во вспышках интерпретируется как ударная поляризация, вызванная бомбардировкой хромосферы пучками электронов во время вспышки.

5.3 Параметры корональной плазмы спокойного Солнца по данным микроволнового излучения

Наблюдения пространственного распределения интенсивности излучения в окрестности лимба спокойного Солнца на волнах сантиметрового и дециметрового диапазонов волн всегда вызывают интерес исследователей, так как это распределение отражает структуру верхней хромосферы, переходной зоны и нижней короны. Характерная форма радиального распределения яркости T_{ν} - почти неизменный уровень на большей части диска и резкое повышение его на лимбе - до сих пор не получила строгого объяснения.

В этой связи представляет интерес возможность исследования радиального распределения яркости по радиоизображениям, получаемым на УСУ ССРТ, угловое разрешение которого достигает 22 секунд дуги. Этот инструмент предназначен для наблюдения активных областей и исследование слабоконтрастных деталей - корональных дыр, волокон, залимбовых участков вызывает значительные трудности из-за недостаточной чувствительности и влияния откликов от ярких источников, температуры которых на волне 5.2см превышают яркость спокойного Солнца в сотни раз. Поэтому для решения поставленной задачи был разработан специальный метод

восстановления первичных радиокарт [6] гибридным методом деконволюции радиоизображений Солнца, основанном на современной модификации нелинейного алгоритма MS-CLEAN. При построении суммарных карт за день компенсировалось дифференциальное вращение, устранялись смещения между отдельными картами. Средний профиль радиояркости был получен совмещением всех дневных карт за 2010-2011 годы.

Во время четвертого этапа Контракта разрабатывалась модель атмосферы Солнца со случайным набором петельных структур совокупностью ранжированных по размерам петель, у которых частота появления α , и величина плотности электронов на вершине являются средними для петель данной области размеров. Первые результаты были представлены в докладах:

1. Криссинель Б.Б. Вероятностные характеристики основных компонент короны спокойного Солнца и расчет экваториального распределения яркости в диапазоне волн 1-100 см. Солнечная и солнечно-земная физика 2012, Сб. тез. Вс. еж. конф. по физике Солнца, Санкт-Петербург, 24 – 28 сентября 2012 г., 70.

2. Криссинель Б.Б., Анфиногентов С.А., Кочанов А.А., Просовецкий Д.В. Экспериментальное исследование эваториального распределения яркости спокойного Солнца по данным ССРТ. Солнечная и солнечно-земная физика 2012, Сб. тез. Вс. еж. конф. по физике Солнца, Санкт-Петербург, 24 – 28 сентября 2012 г., 71.

Характеристики компонент атмосферы находятся итерационным способом по результатам подгонки расчетного экваториального распределения яркости с экспериментальными данными.

Для расчета яркости петли и спикулы разбиваются по высоте на слои $\Delta h_{gr}(l, j)$, высота которых равна проекции на вертикальную ось средней траектории пробега луча в петле или в спикуле, и находится общий набор высот h_{usd} из совокупности этих слоев. После этого находим яркость петли $T_{y,lp}$ и спикулы $T_{y,sp}$ каждого слоя по сетке h_{usd} .

Расчет результирующей яркости и коэффициента передачи ведется путем суммирования вкладов этих элементов по простой логической схеме.

Определение высотных профилей температуры и плотности петель и свободного вещества тесно связано с исходными профилями атмосферы $T(h)$ и $n_e(h)$, удовлетворяющими наблюдательным данным о яркости в центре диска Солнца. В данной работе за основу взята модель спокойной атмосферы, полученная путем соединения корональной части модели, описанной в работе [7] и комбинации моделей FALA и FALC хромосферы и переходной области [8] в соотношении $FALA*0.97+FALC*0.03$.

Модель короны представляется в виде набора из 10 петель с радиусами R_{loop} от 3200 км до 210000 км, высотой начала корональной части $h_0=2275$ км. Принято также, что толщина петель

неизменна по всей длине и равна $R_{loop} / 15$, сами петли ориентированы по радиусу Солнца. Коэффициент разреженности α_r определяется как число петель данного размера, находящихся на площадке размером $2 R_{loop} * 2 R_{loop}$.

Высотный профиль температуры корональной части петель определяется выражением

$$T_{lph}(h) = T_{min} + (T_{maxloop} - T_{min}) (\sin(\pi/2 * (h-h_0)/(R_{loop}-h_0)))^\alpha, \quad (3)$$

где T_{min} – температура штатной модели на высоте h_0 , $T_{maxloop}$ – температура вершины петли, α – подбираемый параметр. Плотность электронов петли

$$n_{eloop}(h) = p_0 * \exp(-(h-h_0)/\lambda_{p0}) / (2 * k_{bolz} * T_{lph}(h)), \quad (4)$$

где p_0 – давление на высоте h_0 , k_{bolz} – постоянная Больцмана, λ_{p0} – масштаб высоты по давлению, $\lambda_{p0} = (R_{loop}) / A_{log}(p_0/p_1)$, p_1 – давление на вершине петли.

В работе принято, что $T_{maxloop}$ на 10% превышает температуру штатной модели на соответствующей высоте. В области ножек петель высотный профиль температуры совпадает с профилем штатной модели, а профиль плотности определяется по штатному профилю в этой области: $n_{elp}(h) = n_e(h) * p_0/p_{sh}$, где p_{sh} – давление штатной модели на высоте h_0 .

Спикулы ранжированы по высотам от 400 км до 11000 км, плотность электронов – $60 \cdot 10^9 \cdot \text{см}^{-3}$, температура -20000 К, относительные площади - от 0.001 до 0.05.

Высотный профиль температуры свободного вещества принят равным профилю штатной модели. Учитывая, что в корональной части основная часть вещества заключена в петельных структурах, а в хромосфере – в свободном веществе (для рассматриваемого диапазона волн), плотность электронов $n_{esv}(h)$ можно оценить по приближенному соотношению для интервала высот $\Delta h(i)$: $n_{esv}(i) \approx n_e(i) - D_{lp}(i) - D_{sp}(i)$,

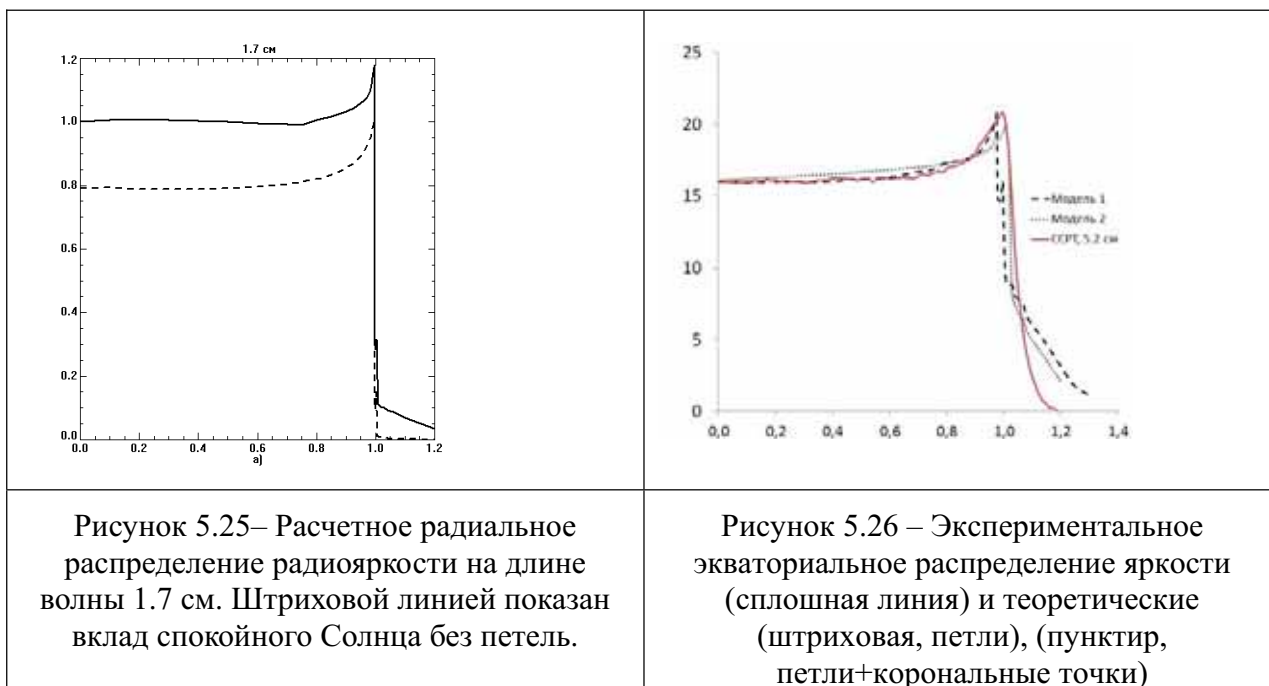
где $n_e(i)$ – средняя плотность штатной модели в слое $\Delta h(i)$, $D_{lp}(i)$, $D_{sp}(i)$ – соответственно совокупные плотности петель и спикул в этом слое с учетом их коэффициентов разреженности и температур.

Для расчета вероятностных характеристик предварительно все петли разбиваются по высоте на отдельные участки. Далее производится расчет вероятности попадания луча в эти участки и отношения средних величин пробега луча в петле к интервалу высот участка. После этого находятся $\Delta hgr(l, j)$ и вероятности Pvl попадания луча в такой слой петли. Аналогичным образом находятся вероятности попадания луча в слои спикул.

Яркость слоя петли находится как среднее значение яркостей слоя при четырех возможных его положениях, учитывая в каждом положении угол падения относительно текущего градиента плотности. Если в слое происходит отражение луча, то производится расчет яркости по траектории отраженного луча. Результирующее затухание в слое вычисляется по затуханиям составляющих с учетом их веса. Аналогичным образом вычисляются яркости спикул.

В целом процесс итерационного моделирования заключается в следующем: задаются параметры петель ($p_0, p_1, \alpha_r, \alpha$), спикул ($n_{esp0}, T_{sp}, D_{sp}, H_{spn}, H_{spv}, z_{sp}$), определяется высотный профиль свободного вещества $n_{esv}(h)$. После этого на заданной длине волны производится расчет яркости атмосферы вдоль экватора к лимбу. По результатам сравнения результатов расчета с известными наблюдательными данными изменяются исходные параметры петель и спикул и расчеты повторяются.

Результирующие яркости в центре диска совпадают с известными экспериментальными данными с точностью 10% в диапазоне волн от 1 до 100 см, достаточно хорошее согласие получено и по основным параметрам экваториальных распределений. На Рисунке 5.25 представлено расчетное распределение на волне 1.7 см (штриховая линия – вклад яркости свободного вещества), а на рисунке 5.26 – расчетные на длине волны 5.2 см и экспериментальное, полученное по карте УСУ ССРТ.



Как видно из рисунка 5.26, экспериментальное распределение яркости достаточно хорошо совпадает с теоретическим, но пик яркости сдвинут примерно на $19''$. Это может быть следствием влияния ярких корональных точек. Исследования корональных точек на волне 5.2 см, проведенное по данным наблюдений на УСУ ССРТ[9], показало, что усредненные параметры их таковы: размер ~ 40 угл. сек., высота излучающей области над фотосферой ~ 18000 км, яркость ~ 40000 К. Основная масса корональных точек наблюдается в «королевской зоне». Дополнительная яркость, вносимая корональными точками, определяется выражением, где P_{bp} - соответственно вероятность нахождения корональной точки по лучу зрения и вероятность отсутствия петельных структур на высоте корональной точки,

P_{bp} - наблюдаемая яркость точки на данной длине волны. Используя распределение Пуассона и представляя корональную точку сферой размером D_{bp} , получаем выражение для вероятности

$$P_{bp} = 1 - \exp(-N_{bp} \cdot D_{bp}^2 \cdot (1 + \tan \theta)) \quad (5)$$

Здесь N_{bp} - число точек на единицу площади, θ - угол падения.

Существенное различие теоретического экваториального и экспериментального распределений наблюдается за лимбом на расстояниях ~ 0.2 солнечного радиуса. Одной из причин этого расхождения может быть трудность точной калибровки по яркости на ССРТ: уровень «нуля», определяемый по гистограмме карты вне солнечного диска, в значительной степени зависит от инструментальных ошибок и присутствия на диске активных областей.

В результате моделирования было получено: базовые давления петель находятся в пределах $2.0 \cdot 10^{-7}$ до $3.0 \cdot 10^{-7}$ дин·см⁻², коэффициенты разреженности в среднем около 7.

6 Закупка оборудования

В целях успешного выполнения государственного контракта было закуплено оборудование на общую сумму 1 770 372 руб. Информация о стоимости отдельных позиций содержится в приложении № 20 (перечень материальных ценностей, созданных и приобретенных в рамках государственного контракта).

Для выполнения НИР на УСУ БСВТ закуплено оборудование для комплектации установки для изготовления интерференционных фильтров:

-Цифровой осциллограф ZET 302, Россия – 1 шт.

Цифровой осциллограф ZET 302 используется для контроля оптической толщины пленок на установке во время напыления интерференционных покрытий.

-Регулятор расхода газа, Нидерланды – 1 шт.

Регулятор расхода газа служит для регулирования подачи газа в источники ионов и электронов установки.

-Столик АЛ 6.124.086 – 2 шт.

-Столик с крест-кремальерным перемещением – 2 шт.

Столики 4 шт - для размещения и юстировки оптико-механических узлов установки.

-Автоматизированная система управления Большим солнечным вакуумным телескопом (УСУ БСВТ) Опытный образец АСУ БСВТ – 1 шт.

Автоматизированная система используется в системе управления солнечного телескопа для измерения крупномасштабных полей, для управления приводами БСВТ, перемещения и фокусировки зеркал двухкамерного спектрографа и для автоматизации работ по регистрации изображений спектров и фильтрограмм.

Для выполнения НИР на УСУ ССРТ закуплено следующее оборудование:

1. Для системы точного времени ССРТ:

-GPS-приемник Resolution T 52664-05 SMB-M –2 шт.

-Для системы управления антеннами ССРТ

-Кварцевый резонатор 25000 кГц 30ppm – 8 шт.

2. Преобразователи для питания антенных модулей многоволнового радиогелиографа:

-устройство преобразовательное СМВ20Д – 100 шт.

-статический преобразователь МПВ5АА – 100 шт.

3. Коаксиальные кабели для аналоговых и антенных модулей многоволнового радиогелиографа:

-Радиочастотный коаксиальный соединитель 086-6SM+ – 480 шт.

4. Коаксиальные кабели для разводки сигнала гетеродина многоволнового радиогелиографа:

-СВЧ кабельная сборка SMA длиной 1270 мм для гелиографа – 100 шт.

Заключение

В рамках выполнения контракта для исследования тонкой структуры солнечной атмосферы методом многоволновой томографии выбраны «диагностические» линии и полосы солнечного спектра, которые показывают структуру на различных высотах солнечной атмосферы. Двумерные изображения солнечных образований будут получаться с помощью узкополосных интерференционных фильтров (ИФ), пропускающих эти линии. Разработана и изготовлена установка для изготовления однородных, стабильных ИФ методом ионного распыления с ионным ассистированием. Основными требованиями к подобным установкам являются равномерность толщины пленок, составляющих покрытие, и минимальные потери в них. Испытания установки показали возможность получения пленок с высокой однородностью по толщине. Благодаря высокой стехиометрии окисных пленок и их беспористости световые потери в пленках низкие. Пространственное распределение плотности ионного потока, найденное в процессе испытания ионного источника распыления, обеспечивает получение пленок однородных по толщине. Изготовлены интерференционные фильтры для солнечной томографии на G –область спектра (λ 4305 Å) на области синего континуума (λ 4320 Å) и на область красного континуума (λ 6340Å) Выполненное на БСВТ исследования спектральных и оптико физических характеристик показали высокий контраст и однородность полосы пропускания фильтров и стабильность характеристик при работе в натуральных условиях.

В рамках проекта осуществлено создание двухкамерного спектрографа на БСВТ: разработана схема двухкамерного спектрографа, изготовлены оптико-механические узлы. Выполнены экспериментальные наблюдения с одновременным получением различных пар спектральных областей. Двухкамерный спектрограф обеспечивает исследования в широком интервале длин волн. Проведены наблюдения солнечных вспышек и протуберанцев. Вследствие наложения спектров разных порядков не все желаемые сочетания пар спектров доступны для исследований, пока не используются дополнительные отрезающие узкополосные фильтры. Вместе с тем, введение второго камерного зеркала позволило одновременно наблюдать различные области спектра, сохраняя его высокое спектральное разрешение практически без ухудшения пространственного разрешения.

На основе технического задания и требований к работе систем управления разработана документация и создан специализированный солнечный телескоп для измерений крупномасштабных полей. При разработке учтены требования: раздельность фундаментов под оптико-механическую систему и модуль с куполом; жесткая, надежная связь фундаментов с

основанием вне зависимости от характера грунта в месте установки телескопа; монолитность и массивность фундамента под оптико-механическую систему для максимального снижения влияния микровибраций приводов на качество изображения. Спроектированная форма купола имеет обтекаемую форму со светоотражающим покрытием и максимально защищает целостат от ветрового воздействия и солнечного нагрева. Конструкция целостата обеспечивает его компактность, высокую точность ведения и непрерывность слежения без «перекладки» целостата при переходе наблюдений от восточной к западной стороне. Особое внимание уделено тому, чтобы конструкция обеспечивала расположение оси вращения в плоскости отражающей поверхности зеркала целостата. Преимущество выбранной схемы специализированного телескопа – измерения магнитных полей с устранением влияния инструментальной поляризации, благодаря тому, что измерения проводятся дважды: без фазовой полуволновой пластинки и с пластинкой. Для этого в конструкции предусмотрен механизм быстрого ввода фазовой пластинки в траекторию светового пучка перед зеркалом телескопа. При разработке документации ССТ для обеспечения и сохранения метрологической точности в процессе предстоящей эксплуатации, ремонта и модернизации в состав телескопа вошли средства и оборудование по возможности стандартные, промышленного изготовления.

В процессе опытных наблюдений выяснилось, что реальные измерительные характеристики магнитографа оказались не хуже расчетных. К основным преимуществам инструмента можно отнести высокую степень стабильности работы всех систем (на протяжении примерно двух месяцев не возникло разъюстировки оптики, отказа электромеханических узлов и электроники), простоту в эксплуатации, несущественное время подготовки инструмента к основным измерениям (примерно три минуты) по сравнению с временем получения магнитограммы КМП (примерно пятнадцать минут), при сохранении высокой точности измерений ($\pm 0,1$ Гс).

Существенным достоинством инструмента являются его метрологические свойства, которые практически не зависят от степени подготовленности наблюдателя. Тем самым обеспечивается высокая однородность и точность данных, которые практически зависят только от астроклиматических и погодных условий обсерватории, в которой производятся наблюдения.

Программа микроволновых наблюдений, как в двумерном, так и одномерном режимах, выполнена полностью. Введены в эксплуатацию новые виды наблюдений на 26-канальном спектрополяриметре в диапазоне 4 – 8 ГГц и цифровом спектрополяриметре 2 – 24 ГГц. Получены уникальные данные наблюдений, обеспечивающие исследования природы солнечной активности и развитие методов прогноза эруптивных явлений в короне Солнца. Объем данных, полученных в наблюдениях микроволнового диапазона, составляет более 200 Гбайт, записанных на оптические

носители. Каталоги наблюдений, обработанные радиокарты по одной в день в интенсивности и поляризации, временные профили тонкой временной структуры микроволновых всплесков доступны на сайтах <http://badary.iszf.irk.ru/> и <http://ssrt.iszf.irk.ru/>. Введен в режим регулярных наблюдений 10-антенный прототип многоволнового радиогелиографа.

На инструментах комплекса ССРТ, БСВТ проходили практику и выполняли дипломную работу студенты Иркутского государственного технического университета, Иркутского государственного университета, Оренбургского государственного университета.

По госконтракту закуплено оборудование на сумму 1770372.0 руб, что составляет 22,1% от объема финансирования в целом. В соответствии с требованиями технического задания оборудование предназначено для комплектации вакуумной установки изготовления интерференционных фильтров, для системы автоматизации управления спектрографа и БСВТ, для системы точного времени ССРТ, для системы управления антеннами ССРТ, для антенных модулей многоволнового радиогелиографа для аналоговых и антенных модулей многоволнового радиогелиографа и для гелиографа.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lesovoi S. V.; Altyntsev, A. T., Ivanov, E. F., Gubin, A. V., Solar Physics 2012., DOI 10.1007/s11207-012-0008-7. The Multifrequency Siberian Radioheliograph.
2. Altyntsev A. T., Lesovoi S. V., Meshalkina N. S., Sych R. A., Yan Y. Radioheliograph Observations of Microwave Bursts with Zebra Structures// Solar Physics. 2011. V. 273. P. 163-177.
3. Meshalkina, N. S.; Altyntsev, A. T.; Zhdanov, D. A.; Lesovoi, S. V.; Kochanov, A. A.; Yan, Y. H.; Tan, C. M. Study of Flare Energy Release Using Events with Numerous Type III-like Bursts in Microwaves, Solar Physics, Online First, 10.1007/s11207-012-0065-y.
4. Жаркова В.В., Мешалкина Н.С., Кашапова Л.К., Алтынцев А.Т., Кузнецов А.А. Влияние самоиндуцированного электрического поля на кинематику электронного пучка и вызванные им во вспышках жесткое рентгеновское и микроволновое излучения// Солнечно-земная физика. 2011. Вып. 17. С. 16-26.
5. [Zharkova V.V.](#), [Meshalkina N.S.](#), [Kashapova L.K.](#), [Kuznetsov A.A.](#), [Altyntsev A.T.](#) Diagnostics of electron beam properties from the simultaneous hard X-ray and microwave emission in the 10 March 2001 flare// Astron. Astrophys. 2011. V. 532. P. A17.
6. Анфиногентов С.А., Кочанов А.А., Просовецкий Д.В. Гибридный метод восстановления радиоизображений Солнца на ССРТ// Тр. Всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика – 2011», под.ред.А.В. Степанова и Ю.А. Наговицына, ISSN 0552-5829, С.-Петербург, 2011,с. 227 -230.
7. Fontenla, J. M.; Avrett, E. H.; Loeser, R. Energy balance in the solar transition region. III - Helium emission in hydrostatic, constant-abundance models with diffusion Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X), vol. 406, no. 1, p. 319-345.
8. Getman, K. V.; Livshits, M. A. A model for the outer solar atmosphere devoid of activity Astronomy Reports, Volume 40, Issue 1, January 1996, pp.104-108
9. В. П. Максимов, Д. В. Просовецкий, Б. Б. Криссинель. Наблюдения ярких корональных точек на волнах 5.2 см и 1.76 см.//Письма в АЖ, 2001, т.21, №2,с. 1-5.