

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Специальная астрофизическая обсерватория
Российской академии наук

УДК 520; 523.3; 523.9; 524

УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН
В.В. Власюк



30 декабря 2019 г.

ОТЧЕТ

о выполнении работ по теме
«Развитие крупной уникальной научной установки
Большой телескоп альт-азимутальный»

Лот 2019-05-592-0001

(промежуточный)

Этап 1: «Разработка проекта модернизации УНУ БТА»

Соглашение № 05.619.21.0016 от 1 ноября 2019 г.

Руководитель работ,
директор САО РАН

В.В. Власюк

Нижний Архыз 2019

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Заместитель руководителя работ по соглашению, заместитель директора САО РАН по научной работе, к.ф.-м.н.

Д.О. Кудрявцев (реферат, введение, разделы 4, 5, заключение)

Главный научный сотрудник лаборатории астроспектроскопии, д.ф.-м.н.

В.Е. Панчук (раздел 1)

Старший научный сотрудник лаборатории астроспектроскопии, к.ф.-м.н.

М.В. Юшкин (раздел 1)

Начальник комплекса БТА

Ю.Б. Верич (раздел 1)

Старший научный сотрудник лаборатории астроспектроскопии, ведущий инженер СЭК БТА, к.т.н.

Г.В. Якопов (раздел 1)

Научный сотрудник лаборатории обеспечения наблюдений, к.т.н.

Э.В. Емельянов (раздел 1)

Ведущий научный сотрудник группы релятивистской астрофизики, руководитель группы, д.ф.-м.н.

Г.М. Бескин (раздел 2)

Старший научный сотрудник группы релятивистской астрофизики, к.ф.-м.н.

В.Л. Плохотниченко (раздел 2)

Заведующий лабораторией перспективных разработок, к.т.н.

И.В. Афанасьева (раздел 3)

Ведущий инженер лаборатории перспективных разработок

В.А. Мурзин (раздел 3)

Ведущий инженер лаборатории перспективных разработок

В.И. Ардиланов (раздел 3)

РЕФЕРАТ

Отчет 57 страниц, 21 рисунок, 7 таблиц, 9 приложений

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ОПТИЧЕСКИЕ ТЕЛЕСКОПЫ, СВЕТОПРИЕМНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ, ЗВЕЗДЫ, ГАЛАКТИКИ, АКТИВНЫЕ ЯДРА ГАЛАКТИК, АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Цель проекта

Задача проекта - комплексное развитие уникальной научной установки "Большой телескоп ультразимутальный (УНУ БТА)" - крупнейшего российского оптического телескопа, развитие международного сотрудничества, вовлечение зарубежных исследователей в совместные научные проекты, повышение открытости, доступности и востребованности УНУ БТА для третьих лиц, расширение круга пользователей и развитие научной коммуникации с ведущими российскими и зарубежными научными центрами и организациями. Целью проекта является улучшение характеристик научного оборудования БТА по спектральному и временному разрешениям - модернизация спектрографа высокого спектрального разрешения НЭС, создание автоматизированного комплекса аппаратуры для реализации методики наблюдений быстропеременных астрофизических объектов с высоким временным разрешением, в том числе для их оперативного («алертного») исследования, создание быстродействующих фотоприемных устройств на основе широкоформатных малошумящих КМОП-фотоприемников для научного оборудования УНУ БТА.

Основные результаты проекта

Первый этап был направлен на разработку проекта модернизации УНУ БТА на 2019-2020 г. Проведены патентные исследования. Проведен обзор и анализ современной литературы и подготовлены технические задания: 1) по проекту модернизации спектрографа высокого разрешения НЭС, 2) по проекту создания автоматизированного комплекса для наблюдений быстропеременных астрофизических объектов с высоким временным разрешением. Проведен обзор и анализ литературы и подготовлена конструкторская документация по проекту создания быстродействующих фотоприемных устройств на основе широкоформатных малошумящих КМОП-приемников. Проведены торговые процедуры по закупке оборудования, материалов и комплектующих, необходимых для реализации проекта. Начата реализация второго этапа проекта в части обеспечения проведения исследований для сторонних организаций с использованием УНУ БТА.

Набор технических решений, положенных в схему кварцевого эшелле-спектрографа НЭС, оставляет возможность существенного увеличения его характеристик, в т.ч. квантовой эффективности до 8%, одновременно регистрируемого диапазона в красном и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн – в два раза, выигрыш по потоку при наблюдении слабых объектов – 50%. Спектрографы высокого разрешения крупных телескопов разрабатываются по индивидуальным проектам и, силу специфики каждого телескопа, не имеют аналогов. НЭС, построенный в 1997 году, занял второе место по диаметру коллимированного пучка после спектрографа HIRES 10-м телескопа обсерватории Кека

(США), и сохранял это место вплоть до разработки спектрографа ESPRESSO в 2016 г. (Южная европейская обсерватория). По техническим возможностям не имеет аналогов в России.

В проекте автоматизированного комплекса для наблюдений быстропеременных астрофизических объектов предполагается обеспечивать несколько мод наблюдений для получения максимума характеристик излучения объекта (спектральных, поляриметрических, фотометрических) с высоким временным разрешением, по крайней мере, на уровне субсекунд. В настоящее время в мире нет приборов, соответствующих сформулированным в проекте требованиям, для инструментов, ориентированных на детальное исследование вновь обнаруженных нестационарных явлений и процессов.

Технологии КМОП-фотоприёмников и камер на их основе широко развиты в настоящее время во всех областях применения, но КМОП-приёмники, которые могли бы отвечать одновременно всем специфическим требованиям астрономического применения – большой формат, быстродействие, высокая квантовая эффективность и низкий шум считывания – только в последние годы начали появляться на рынке. Результаты проекта позволят реализовать, по сути, новый класс фотоприёмных устройств – широкоформатные малошумящие фотоприёмные системы на основе быстродействующих фотоприёмников КМОП. На 6-м телескопе БТА фотоприёмные системы предполагается использовать в следующих приложениях: интегральная полевая спектроскопия и интерферометрия с интерферометром Фабри-Перо, спекл-интерферометрия и компенсация искажений волнового фронта.

Таким образом, результаты первого этапа, а именно разработанный проект развития УНУ БТА на 2019-2020 г, полностью соответствует поставленным задачам – доведению установки до уровня лучших мировых аналогов, обеспечению ее конкурентоспособности и расширению круга пользователей, в том числе зарубежных исследователей.

Назначение и область применения результатов проекта

Реализация проекта позволит проводить на УНУ БТА наблюдения высокого спектрального и высокого временного разрешения на новом, более эффективном уровне, что открывает возможности для расширения тематики наблюдательных программ и повышает конкурентоспособность установки на мировом уровне. Результаты будут востребованы научным сообществом, в том числе иностранными и российскими исследовательскими центрами, не обладающими достаточными финансовыми возможностями для создания собственных аналогичных объектов научной инфраструктуры. Разработанные в ходе реализации проекта методики и технические решения могут быть использованы в других научно-исследовательских институтах России и зарубежья, высших учебных заведениях, прикладных и ведомственных организациях и учреждениях для создания собственных инструментальных средств, решающих широкий спектр научных и народно-хозяйственных задач по контролю околоземного пространства, анализу параметров космических аппаратов, предотвращению кометно-астероидной опасности. Существующий у САО РАН опыт позволяет утверждать, что большинство разработанных оптико-механических и светоприемных узлов будут востребованным продуктом и могут быть воспроизведены в интересах внешних заказчиков.

Эффекты от внедрения результатов проекта

Повышение уровня проводимых в Российской Федерации астрономических исследований. сохранение и развитие научного и научно-технического потенциала, привлечение молодежи к работе в научной сфере, создание благоприятных условий для международного сотрудничества, научно-технический прогресс, обеспечивающий готовность страны к большим вызовам.

Формы и объемы коммерциализации результатов проекта

Создаваемые в ходе реализации разработки оптических, оптико-механических и фотоприемных устройств могут быть востребованы другими научно-исследовательскими предприятиями страны. Как показывает практика ранее завершенных проектов, разработки САО РАН востребованы обсерваториями страны и ближнего зарубежья, российскими космическими программами и предприятиями прикладной сферы в области наблюдения околоземного пространства. Устройства на основе КМОП-фотоприемников могут быть перенесены в промышленность с целью изготовления малых серий для решения прикладных задач.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ		8
1	Проект модернизации спектрографа высокого разрешения НЭС	9
2	Проект создания автоматизированного комплекса аппаратуры для наблюдений быстропеременных астрофизических объектов с высоким временным разрешением	19
3	Проект создания быстродействующих фотоприемных устройств на основе широкоформатных малощумящих КМОП-фотоприемников	24
4	Закупка оборудования, материалов и комплектующих	49
5	Проведение плановых наблюдений на УНУ БТА, в том числе в интересах сторонних организаций	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		56
ЛИТЕРАТУРА		57
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Отчет о патентных исследованиях на 44 стр.		
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Техническое задание на изготовление узлов предщелевой части и системы дистанционного управления спектрополяриметрическим комплексом фокуса Нэсмит-2 на 8 стр. (в рамках		
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Техническое задание на разработку и изготовление адаптивной системы для коррекции крупномасштабных aberrаций волнового фронта светового излучения в оптическом телескопе на 6 стр.		
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Техническое задание на изготовление отражательных дифракционных решеток для эшелле-спектрографа высокого разрешения фокуса Нэсмит-2 БТА на 5 стр.		
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Техническое задание на создание автоматического фотоспектрополяриметра высокого временного разрешения фокуса Нэсмит-1 БТА на 9 стр.		
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Техническое задание на изготовление преобразователя «Время – код» (Квантохрон 5-48) на 10 стр.		
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Конструкторская документация на 229 стр.		
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Техническое задание на опытно-конструкторскую работу «Разработка фотоприёмного устройства на базе КМОП-матрицы <i>GSense4040</i> » на 11 стр.		
ПРИЛОЖЕНИЕ 9. Протоколы решений НКТРТ, расписание наблюдений БТА, отчеты секретаря НКТРТ о наблюдениях в 2019г. на 53 стр.		

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

УНУ – уникальная научная установка

БТА – Большой телескоп альт-азимутальный

НЭС – (Nasmyth Echelle Spectrograph) эшелле-спектрограф фокуса Нэсмита

САО РАН – Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук

РАТАН-600 – Радиотелескоп Академии наук с диаметром антенны 600 м

ФПУ – фотоприемное устройство

УФ-диапазон – ультрафиолетовый диапазон (электромагнитного спектра)

ИК-диапазон – инфракрасный диапазон (электромагнитного спектра)

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ФПВВР – фотометр-поляриметр высокого временного разрешения

ВВЕДЕНИЕ

Уникальная научная установка "Большой телескоп альт-азимутальный" Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук (САО РАН) – это комплекс, состоящий из крупнейшего российского оптического телескопа (БТА) с диаметром главного зеркала 6м и малого (1м) телескопа Цейсс-1000. Благодаря многолетней успешной работе БТА и второго крупного телескопа САО РАН – РАТАН-600 – обсерватория является крупнейшим центром наземных астрономических наблюдений России. В настоящее время телескопы полностью востребованы для выполнения задач наземной наблюдательной астрономии как российскими, так и иностранными специалистами, наблюдательное время на них выделяется на конкурсной основе по решению Национального комитета по тематике российских телескопов. Однако появление в мире телескопов большего размера, развитие космических программ ставит задачу по поиску такого формата работы УНУ БТА, где 6м телескоп сможет успешно конкурировать с более мощными инструментами. Таким форматом является повышение рабочих характеристик телескопа до уровня лучших мировых аналогов, модернизация имеющегося оборудования на основе современных технологий и в ряде случаев разработка уникального научного оборудования, позволяющего успешно выполнять научные исследования на современном уровне. Практика показывает, что САО РАН успешно справляется с этой задачей – результаты, полученные на инструментах обсерватории, востребованы в ведущих мировых и российских научных журналах. Для успешного продолжения этой практики необходимо постоянно поддерживать эффективную работу инструментов на мировом уровне.

Проект направлен на повышение эффективности работы УНУ в части наблюдений высокого спектрального и высокого временного разрешений. Улучшение характеристик установки будет способствовать увеличению заинтересованности российских и иностранных ученых в ее использовании для решения таких актуальных задач современной астрофизики, как изучение транзиентных событий и релятивистских объектов, энерговыделения в космических объектах с критическим состоянием вещества, физики и эволюции звезд и звездных систем, отождествление оптических транзиентов, связанных с гамма-всплесками и гравитационными событиями, исследование экзопланет. Кроме того, это открывает новые темы для молодых специалистов, аспирантов и студентов. Участие молодых сотрудников обсерватории в реализации проекта модернизации оборудования УНУ БТА и проведении наблюдений будет способствовать росту их научно-технической компетенции. Выполнение программы также направлено на реализацию мероприятий в рамках приоритетных направлений Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации – переходу к передовым цифровым и интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, созданию систем обработки больших объемов данных, – а также будет обеспечивать вклад фундаментальной науки в готовность страны к большим вызовам, потенциально возможным в процессе развития цивилизации.

Основные результаты проводимых по контракту научных исследований в настоящем отчете представлены в соответствии с содержанием работ. Приводятся результаты работы по проекту, проведенной за отчетный период 2019 г.

1. ПРОЕКТ МОДЕРНИЗАЦИИ СПЕКТРОГРАФА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ НЭС

1.1 Обзор и анализ современной литературы, обоснование выбора технических решений

Кварцевый эшелле спектрограф фокуса Нэсмита (НЭС [1]), построенный в 1997 году, занял второе место по диаметру коллимированного пучка (после спектрографа HIRES [2]), и сохранял это место вплоть до разработки спектрографа ESPRESSO [3]. Напомним, что в спектроскопии высокого разрешения - увеличение d_{coll} означает либо пропорциональное увеличение в спектральном разрешении R , либо пропорциональное увеличение в светосиле по потоку L (при прежнем значении R). Обзор по спектрографам высокого разрешения, используемых и без оптоволоконного сочетания с телескопом, в классе телескопов большого диаметра ограничивается спектрографами HIRES, НЭС, UVES [4] и ESPRESSO (упомянуты в порядке ввода в эксплуатацию за последние 30 лет). Обзор по спектрографам с оптоволоконным сочетанием [5] нами не обновлялся.

Мы предлагаем существенно модернизировать НЭС с целью увеличения его эффективности по свету и позиционной стабильности, что в дальнейшей перспективе позволит перевести прибор в режим удаленных наблюдений. Также планируется модернизация узла основного диспергирующего элемента НЭС для перехода к режиму сверхвысокого спектрального разрешения $R \geq 100\,000$. Основным преимуществом НЭС по сравнению с отечественными и мировыми аналогами является высокая эффективность в наземном УФ-диапазоне (305–390 нм). На данный момент НЭС не использует свой потенциал в полном объеме из-за невозможности, в первую очередь, откалибровать спектры в коротковолновом диапазоне. Поэтому мы планируем полную модернизацию калибровочного модуля как для повышения позиционной стабильности и точности привязки спектров к шкале длин волн, так и для продвижения калибровки вплоть до границы прозрачности земной атмосферы в УФ-диапазоне. Для достижения поставленных целей необходимо провести комплекс работ, неразрывно связанных друг с другом. (1) Изготовление мозаичной эшелле-решетки с полным штрихом. В настоящее время на НЭС используется эшелле неглубокой нарезки (с неполным штрихом) 37.5 штр/мм. При численном моделировании схемы НЭС удалось определить долю потерь (40% от площади коллимированного пучка), возникающих вследствие нарезки эшелле на неполную глубину штриха. (2) Адаптация к НЭС решетки скрещенной дисперсии 150 штр/мм. Выигрыш в красном и ближнем ИК-диапазонах – 100% по числу одновременно регистрируемых элементов спектра. С новой мозаичной эшелле-решеткой данный элемент скрещенной дисперсии обеспечит более эффективное использование площади светоприемника в коротковолновом диапазоне. (3) Разработка новой схемы компенсатора наклонов волнового фронта (локального корректора) фокуса Нэсмита-2 и компенсатора дефокусировки. При работе со слабыми объектами выигрыш по потоку составит до 50% (в зависимости от качества изображений). (4) Разработка новой схемы узла калибровки (искусственная звезда). Предполагается разработать и изготовить новые источники непрерывного и линейчатого спектра с увеличенным потоком в УФ-диапазоне. Также требуется разработка и изготовление нового зеркального осветителя для канала калибровки, имитирующего оптический тракт телескопа. Новый калибровочный модуль предполагается установить до компенсатора наклонов волнового фронта, что обеспечит большую стабильность калибровки. Локальный корректор будет компенсировать тепловую нестабильность калибровочного модуля, что в нынешней схеме предцелевой части НЭС выполнить принципиально невозможно. (5) Разработка метода дистанционной юстировки мозаичной эшелле. Выигрыш – в доступности прибора и возможности предварительной подготовки к наблюдениям. (6) Оснащение НЭС несъемным

светоприемником. В случае формата 4Кх4К – выигрыш по числу одновременно передаваемых элементов спектра – 100%. Экономия наблюдательного времени при выборе рабочего участка длин волн и снижения времени, расходуемого на калибровку. (7) Разработка компенсатора вращения поля в фокусе Нэсмит-2, что позволит реализовать новую методику – задачи, решаемые в режиме «длинная щель» (наблюдения протяженных объектов с высоким спектральным разрешением).

1.2. Особенности оптической схемы НЭС

На рис.1.2.1 приведена оптическая схема НЭС - нэсмитовского эшелле спектрографа [6]. Такое техническое решение реализовано впервые в мировой практике.

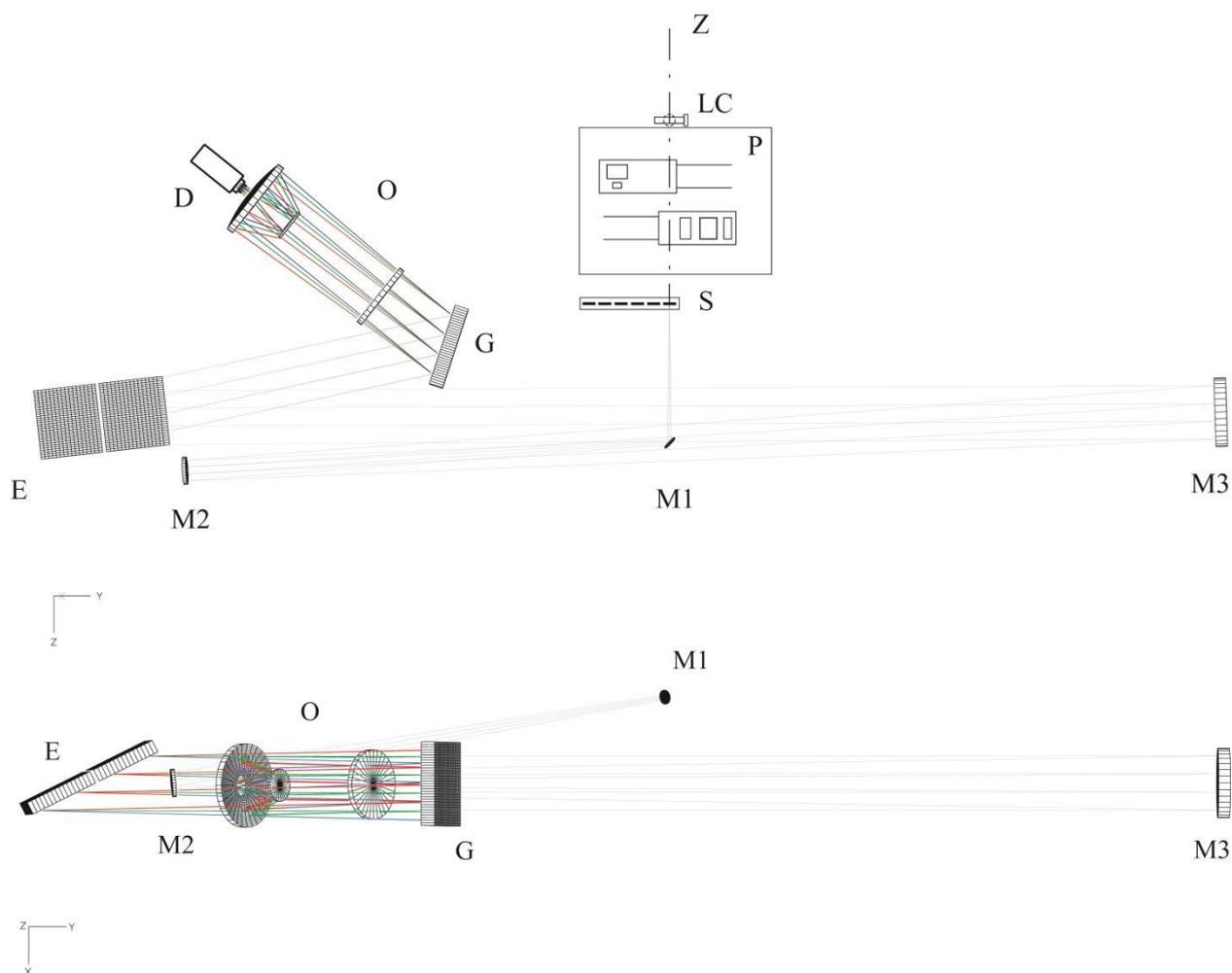


Рис.1.2.1. Схема НЭС. Вверху - вид в плане на платформу фокуса Нэсмит-2, внизу - вид в плоскости, перпендикулярной оси «Z» телескопа БТА. Обозначения: Z – ось зенитных расстояний, LC – локальный корректор изображения звезды, P – платформа предцелевых устройств, S – узел щели, деккеров и резателей, M1 – первое плоское зеркало коллиматора, M2 – второе плоское зеркало коллиматора, M3 – параболическое зеркало коллиматора, E – составная эшелле, G – узел сменных решеток скрещенной дисперсии, O – катадиоптрический камерный объектив, D – криостат с матрицей ПЗС. Все элементы изображены в одном масштабе.

Главными элементами технического решения схемы НЭС являются: 1) горизонтальное размещение крупногабаритных оптико-механических узлов; 2) высокое пропускание оптики в широком диапазоне, включая наземный ультрафиолет; 3) отсутствие в схеме камеры оптических элементов, прилегающих к приемнику; 4) использование сменных дифракционных решеток в качестве элемента скрещенной дисперсии, 5) использование составной (т.н. «мозаичной») эшелле, 6) отказ от вариантов оптоволоконного сочетания с телескопом.

Перечисленные пункты обеспечивают:

П.1 – высокую жесткость механической конструкции. Главная плоскость спектрографа находится на 37см. ниже оси «Z» телескопа БТА. Эту плоскость удалось опустить в схеме коллиматора с двумя ломающими зеркалами. Первое плоское зеркало коллиматора (M1 на рис.1.2.1) направляет расходящийся пучок на второе плоское зеркало (M2 на рис.1.2.1), находящееся ниже положения оси «Z». При наклоне зеркала M1 и повороте пучка на 90°, - изображение щели, наблюдаемое через зеркало, поворачивается. Этот эффект практически компенсирует наклон изображения щели к оси спектрального порядка, возникающий из-за ненулевого значения угла γ в случае «С» по [7], см. рис.1.2.2. Схема ломаного коллиматора выполнена из требований к жесткости конструкции, а также по габаритным ограничениям (размер платформы фокуса Нэсмита составляет 6x4 м, при фокусном расстоянии коллиматора $F_{coll}=7200$ мм). Идея компенсации поворота изображения щели реализована впервые в мировой практике.

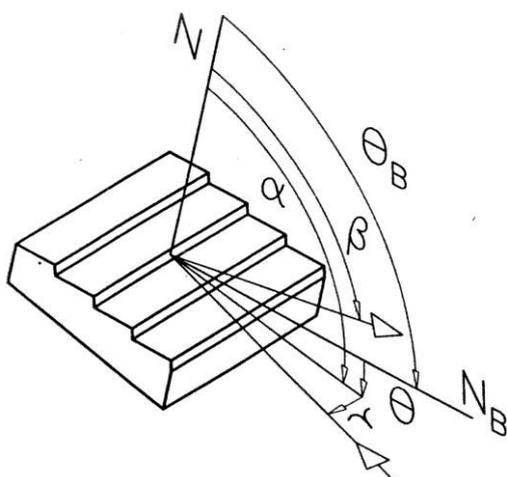


Рис.1.2.2. Ход лучей на эшелле. Обозначения: N – нормаль к плоскости подложки, N_V – нормаль к рабочей грани эшелле, α – угол падения лучей, β – средний угол дифракции, γ – угол отклонения падающих и дифрагированных лучей от главной плоскости эшелле, θ_B – угол блеска эшелле, $\theta = \alpha - \theta_B$. В случае «С» по [7] - $\alpha = \beta$, $\theta = 0$, $\gamma \neq 0$.

П.2 – Камерный объектив спектрографа изготовлен на ЛОМО (разработка КБ1704) по техническому заданию, составленному одним из авторов (ПВЕ). Схема камеры (рис.1.2.3) – Schmidt-Cassegrain-Mangin (русск. Шмидт-Кассегрен-Манжен), причем шмидтовская пластина и манженовский мениск двойного хода изготовлены из плавленого кварца. Последнее обеспечивает высокую эффективность

спектрографа в наземном УФ (310÷390 нм), где спектрографы с оптоволоконным сочетанием уступают [5].

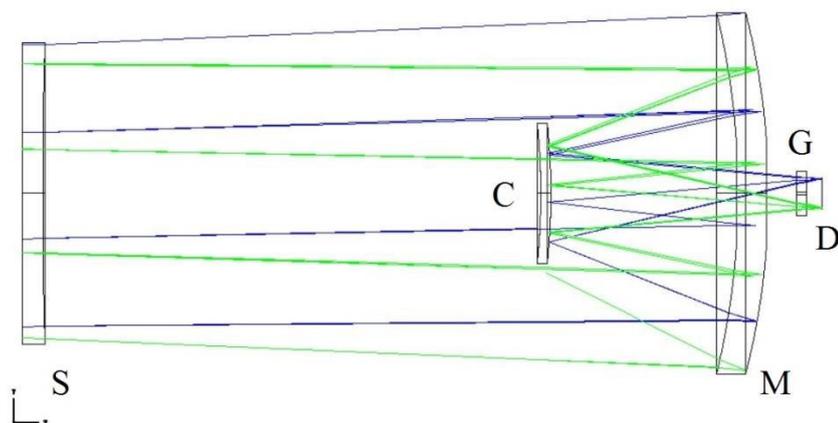


Рис.1.2.3. Схема камерного объектива НЭС ($F_{cam}=600\text{мм}$). Обозначения: S – коррекционная пластина Шмидта ($D=305\text{мм}$), M – манженковский мениск двойного хода, C – вторичное кассегреновское зеркало, G – защитное стекло криостата, D – плоскость матрицы ПЗС.

П.3 - Манженковский мениск выполняет и функцию полеспрямляющей линзы, что позволило последовательно устанавливать в фокальной плоскости камеры приемники всё увеличивающегося формата, без изготовления и юстировки очередных полеспрямляющих линз (как это практиковалось на камере близкой светосилы, используемой на ОЗСП [8]). Большой свободный задний отрезок камеры (40 мм) и схема крепления мениска позволяют устанавливать криостаты различного конструктивного исполнения. Отражающая поверхность манженковского мениска защищена собственно мениском. Идея замены полеспрямляющей линзы, устанавливаемой непосредственно перед приемником, на подбор радиусов кривизны поверхностей манженковского мениска, - в мировой практике эшелле-спектроскопии реализована впервые.

П.4 – В качестве элементов скрещенной дисперсии используются реплики нарезных дифракционных решеток, работающие в первом порядке. Размер заштрихованной области $360\times 320\text{ мм}^2$, плотность штрихов составляет 600, 300 и 150 штр/мм. Решетка 600 штр/мм предназначена для работ в высоких (коротковолновых) порядках эшелле спектра, в случае спектрополяриметрических наблюдений и (или) в случае применения резателей (рассекателей) изображения. Решетка 300 штр/мм оказалась наиболее востребованной, и позволяет работать с рассекателем на три среза в диапазоне $\lambda > 390\text{нм}$. Решетка 150 штр/мм предназначена для работ в ближнем ИК-диапазоне, с целью более плотной упаковки эшелле-порядков в кадре. Предпочтение решеткам (по сравнению с использованием системы призм или гризмы) отдано по следующим причинам. Во-первых, в практике эшелле-спектроскопии призмы (или гризмы) на коллимированных пучках более $d_{coll} = 200\text{мм}$ пока не применяются (из-за высокой стоимости). Например, на спектрографе HIRES [2] ($d_{coll} = 300\text{мм}$) телескопа Кеск в качестве элемента скрещенной дисперсии используется составная (!) дифракционная решетка. Во-вторых, использование призм или гризм ограничивает маневр по диапазону длин волн (в случае жесткой конфигурации схемы «коллиматор – эшелле - узел кроссдисперсии – камерный объектив»). В-третьих, при увеличении d_{coll} возрастают потери в объеме призм. В-четвертых, при использовании призм или гризм нарушается линейная форма спектральных порядков, что создает дополнительные проблемы при обработке

спектрополяриметрических эшелле-изображений. И, наконец, применение призмы (или системы призм) снижает точность спектроскопии в красном и ближнем ИК диапазонах. Дело в том, что при плотном расположении низких эшелле-порядков (см., например, рис.1.2.4) межпорядковые пространства заполнены рассеянным светом, доля которого изменяется по обеим координатам кадра. Заметим, что в красную сторону у большинства звезд возрастает распределение энергии, поэтому и доля рассеянного света в межпорядковых пространствах возрастает.

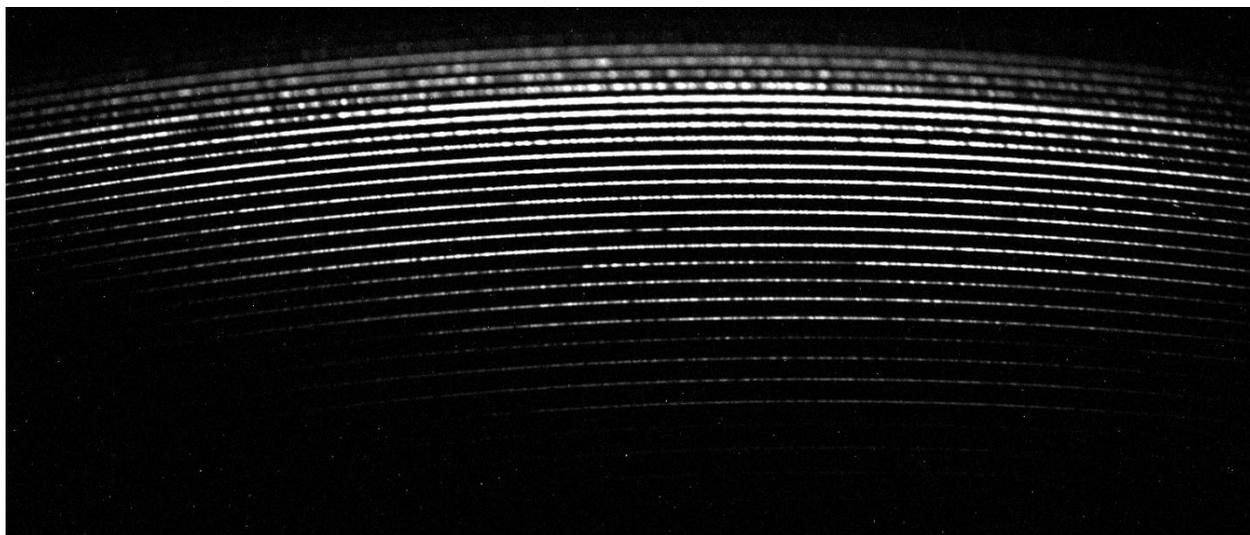


Рис.1.2.4. Пример эшелле-изображения в схеме, где элементом скрещенной дисперсии служит призма. Низкие порядки изображены в верхней части кадра.

П.5 – обеспечивает высокое значение d_{coll} (с 235мм до 270мм, последнее достигается в случае увеличения относительного отверстия в фокусе Нэсмита средствами корректирующей оптики). Опыт юстировки мозаичной эшелле показывает, что этот элемент схемы не является принципиально критичным в задаче увеличения спектрального разрешения. Рассматривается техническая возможность дистанционной юстировки мозаичной эшелле, для чего необходимо построить испытательный стенд (т.н. «оправу мозаики»).

На рис.1.2.5 приведены точечные диаграммы, рассчитанные по основным параметрам камеры и реализованной геометрии схемы спектрографа. Из рисунка следует, что схема спектрографа при соответствующей юстировке обеспечит разрешение $R \sim 110000$.

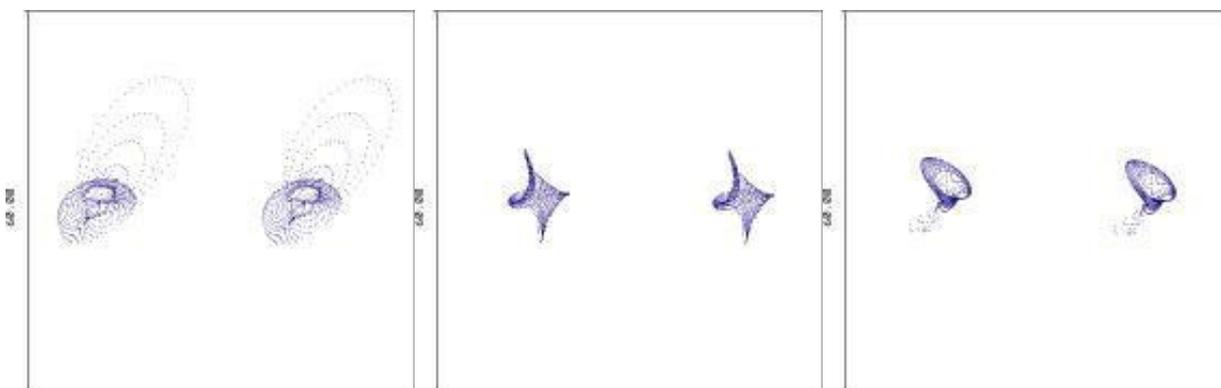
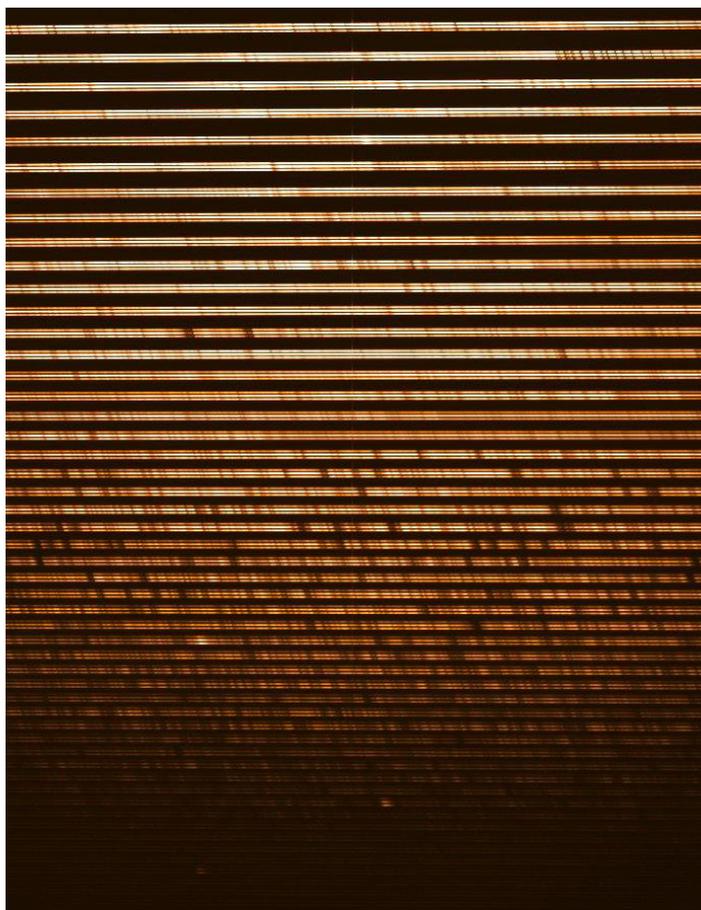


Рис.1.2.5. Точечные диаграммы спектрографа НЭС в центральных частях трех эшелле-порядков. Крайние диаграммы соответствуют двум спектральным порядкам на краях кадра, - коротковолновом и длинноволновом, средняя диаграмма соответствует спектральному порядку в

середине ПЗС-кадра. Размер бокса равен 60 мкм, что соответствует размеру 4x4 элемента матрицы ПЗС. В каждом порядке показаны точечные диаграммы в двух длинах волн, расстояние между которыми соответствует спектральному разрешению $R=80000$.

На рис.1.2.6 приведено одно из эшелле-изображений, получаемых на матрице ПЗС форматом 2Кх4.6К, заимствуемой со спектрографа ОЗСП на периоды наблюдений на НЭС (с 2010 г. по август 2019г.). Кстати, такой режим работы со светоприемником серьезно затруднял как эксплуатацию спектрографа, так и развитие последнего. Ввод в опытную эксплуатацию матрицы ПЗС, изготовленной для НЭС, позволяет приступить к реализации программы увеличения потенциального качества спектрографа.



- *Рис.1.2.6. Эшелльный спектр красного сверхгиганта класса S, полученный на БТА с высоким спектральным разрешением $R=60000$, со спектрографом НЭС и ПЗС форматом 2Кх4.6К, в интервале длин волн 3550-6980 Å. Спектр получен с резателем (рассекателем) изображения (каждый порядок состоит из трех полосок)*

П.6 – отказ от вариантов оптоволоконного сочетания с телескопом сохраняет возможность наблюдений на НЭС с «высокой» щелью (рис.1.2.7). Подобные спектры позволяют измерять скорости расширения туманностей на различных этапах эволюции PN. Другие возможности данного технического решения будут рассмотрены в документе о режимах калибровки и коррекции изображения.

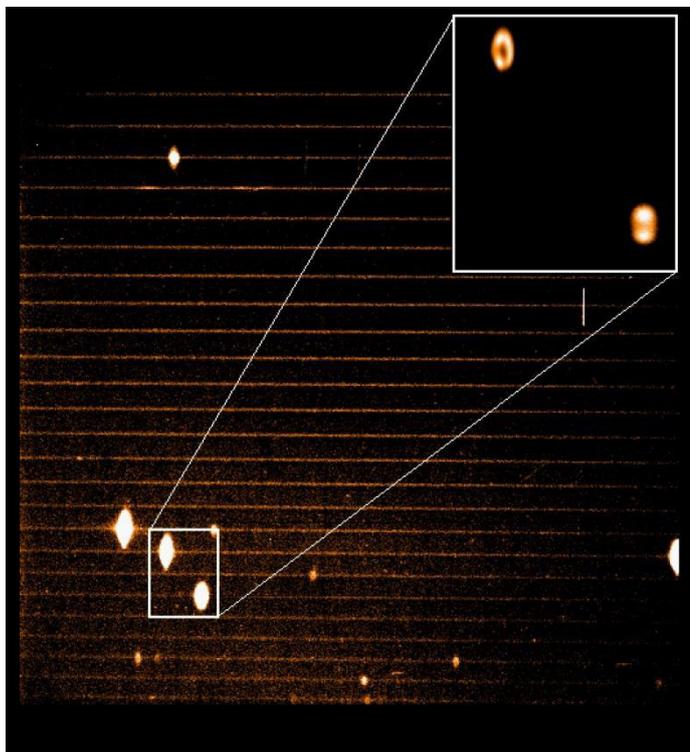


Рис.1.2.7. Эшелельный спектр планетарной туманности IC 3568, полученный с «высокой» целью. На врезке приведены увеличенные доплеровские изображения двух линий, откуда следует, что в линиях ионов разных элементов кинематика различна. Тонкая белая линия под врезкой – «неуширенная» движениями линия 5577Å ионосферного происхождения.

Принципиальные недостатки оптоволоконного сочетания спектрографа (для текущего состояния БТА) будут рассмотрены отдельно.

1.3. Модернизация спектрографа высокого спектрального разрешения НЭС БТА

Учитывая приведенные выше особенности оптической схемы НЭС мы предлагаем ряд работ по модернизации спектрографа с целью повышения его основных характеристик (светосила по потоку L , спектральное разрешение R , число одновременно регистрируемых элементов спектра N).

1.3.1. Разработка и изготовление нового блока калибровки.

Выполненные в предыдущие годы эксплуатации НЭС позиционные измерения показали, что основным источником нестабильности является узел калибровки [10]. К тому же линзовая оптика канала калибровки отсекает излучение с длиной волны короче 350нм, что ограничивает точность калибровки шкалы длин волн в наземном ультрафиолете. Поэтому планируется изготовления нового калибровочного модуля с зеркальным осветителем. В этом направлении планируются следующие работы:

- разработка и изготовление нового источника эмиссионного спектра,
- разработка и изготовление нового источника непрерывного спектра с возможностью калибровки в наземном ультрафиолете (здесь планируется использовать несколько источников непрерывного света с различной цветовой температурой с выравнивающими светофильтрами),

- разработка нового зеркального осветителя с высокой эффективностью в УФ-диапазоне, устанавливаемого до компенсатора наклонов волнового фронта имитирующего засветку от телескопа.

1.3.2. Разработка компенсатора наклонов волнового фронта в фокусе Нэсмит-2.

Телескоп БГА, как любая механическая система, имеет набор собственных частот, колебания на которых мог возбуждаться по целому ряду причин (периодическая ошибка механических передач приводов телескопа, переменная скорость работы приводов, ветровая нагрузка и т.д.). Амплитуда колебаний телескопа на собственных частотах составляет несколько угловых секунд. Атмосферная турбулентность, в свою очередь, приводит к сильным искажениям волнового фронта излучения исследуемого объекта. Первые члены разложения этого искажения на ортогональные полиномы являются наклоном волнового фронта, усредненным по поверхности зеркала.

В рамках данного проекта предлагается разработать и изготовить компенсатор наклонов волнового фронта. Частота работы этого компенсатора должна быть не хуже 5Гц; это позволит практически полностью компенсировать механические колебания телескопа и устранить наиболее сильные смещения изображения звезды, вызванные атмосферной турбулентностью.

1.3.3. Разработка и изготовление нового узла подсмotra входной щели НЭС.

Подсмотр входной щели спектрографа служит для контроля положения изображения звезды в фокусе телескопа и осуществления обратной связи для компенсатора наклонов волнового фронта. Подсмотр в фокусе Нэсмит-2 обслуживает помимо НЭС еще несколько спектрографов: основной звездный спектрограф ОЗСП и светосильный эшелле спектрограф «Рысь». Переключение между спектрографами должно осуществляться без дополнительной юстировки оптики канала подсмotra.

1.3.4. Разработка и изготовление компенсатора вращения поля в фокусе Нэсмит-2

В фокусе любой альт-азимутальной системы, представителем которой является и БГА, изображение объекта при сопровождении телескопом поворачивается вокруг визирной оси. Скорость и направление этого вращения зависит от положения объекта на небесной сфере. Спектроскопические наблюдения звездообразных (точечных) объектов не требуют компенсации этого вращения. Однако программы исследования протяженных объектов как в случае наблюдений с классической входной щелью, так и в режиме спектроскопии с высокой щелью или резателем изображения, требуют компенсации вращения изображения в течение всей серии экспозиций. Исследования звезд с оболочками, чьи угловые размеры сравнимы с турбулентным диском точечного источника, с применением резателя изображения показывают различие в профилях отдельных спектральных линий на разных спектральных срезах. Поэтому даже в некоторых задачах спектроскопии звездообразных объектов может потребоваться компенсатор вращения поля.

1.3.5. Разработка и изготовление нового модуля смены предцеливых устройств (анализатор линейной поляризации, анализатор круговой поляризации, йодная ячейка, интерферометр Фабри-Перо) для быстрого переключения наблюдательных мод

В различных задачах спектральных исследований астрофизических объектов могут потребоваться различные вспомогательные устройства, позволяющие либо получить дополнительную информацию

об источнике излучения, либо существенно увеличить точность позиционных или фотометрических измерений. Так, например, для проведения поляриметрических исследований необходимы анализаторы линейной и круговой поляризации. Для увеличения точности измерения лучевых скоростей необходимы йодная ячейка или интерферометр Фабри-Перо, и т.д. Для быстрого переключения различных вариантов наблюдений планируется добавить дистанционно управляемую платформу, при помощи которой в пучок света перед входной щелью спектрографа будет вводиться то или иное устройство.

1.3.6. Разработка и изготовление модуля дистанционной смены входных щелей спектрографа для быстрого переключения наблюдательных мод

Спектрограф НЭС оснащен несколькими входными щелями: классическая входная щель с одинарным деккером для наблюдений в УФ-диапазоне, щель с двойным деккером для поляриметрических наблюдений, резатели изображения с разной шириной срезов, высокая щель для спектроскопии протяженных объектов. Необходимо изготовить дистанционно управляемый узел для быстрой смены входных щелей спектрографа при переключении режимов наблюдений.

1.3.7. Адаптация новой дифракционной решетки скрещенной дисперсии с плотностью нарезки 150 штр/мм для увеличения одновременно регистрируемого спектрального диапазона (до 100% в красном и ближнем ИК-диапазонах)

Изначально на НЭС в качестве приемника излучения была установлена ПЗС-матрица форматом 1000x1000 элементов, хотя оптическая схема спектрографа была рассчитана на формат приемника 2000x2000 элементов. Появление крупноформатных ПЗС-матриц с высокой чувствительностью в красном и ближнем ИК-диапазонах и свободных от эффектов интерференции в тонкой подложке позволило проводить наблюдения в более длинноволновом диапазоне, чем рассчитывалось изначально. В качестве элемента скрещенной дисперсии в схеме НЭС используется дифракционная решетка, дисперсия которой растет с увеличением длины волны излучения. Поэтому в красном и, тем более, в ближнем ИК-диапазонах расстояния между соседними эшелле-порядками оказывается слишком большим, что приводит к неэффективному использованию полезной площади светоприемника. К тому же дифракционная решетка скрещенной дисперсии, работающая на НЭС, имеет максимальную эффективность в коротковолновой части оптического диапазона. Поэтому было принято решение об изготовлении новой крупноформатной дифракционной решетки с уменьшенной плотностью штрихов и смещенной в длинноволновую область эффективностью для наблюдений вплоть до красной границы чувствительности ПЗС-матрицы.

1.3.8. Разработка и изготовление новой мозаичной эшелле-решетки с полным профилем штриха для повышения квантовой эффективности спектрографа НЭС до 40%.

Параметры мозаичной эшелле-решетки НЭС выбирались из условия упаковки спектра на приемник форматом 2000x2000 элементов. Поэтому была необходима низкая плотность нарезки решетки. Дифракционные решетки с малым числом штрихов имеют низкую эффективность из-за технологических особенностей изготовления таких решеток. Установка нового крупноформатного приемника излучения на НЭС дает возможность увеличить свободный спектральный интервал, что требует увеличению количества штрихов. А это обстоятельство в свою очередь позволяет изготовить более эффективные эшелле-решетки. К тому же исследования абберрационных характеристик камеры

НЭС показали принципиальную возможность достижения спектрального разрешения $R=100\ 000$, для этого также необходимо изменить параметры эшелле.

1.3.9. Разработка и изготовление системы дистанционной юстировки мозаичной эшелле-решетки

Как было отмечено выше, основной диспергирующий элемент НЭС выполнен в виде мозаики из двух эшелле-решеток. Получение расчетного спектрального разрешения возможно при точной юстировке двух половинок мозаики относительно друг друга. Подготовка к каждому наблюдению на НЭС включает в себя проверку состояния мозаики и, в случае необходимости, сведение мозаики. Рамках этого проекта планируется разработать и изготовить новую оправу для эшелле-решеток с прецизионными приводами для дистанционной юстировки мозаики.

1.3.10. Адаптация нового приемника излучения, оснащение устройством непрерывной заливки жидким азотом

Для уменьшения собственных шумов светоприемника требуется его охлаждения до криогенных температур. В частности, ПЗС-матрица на НЭС охлаждается до температуры -130°C при помощи жидкого азота. Одной заправки криостата светоприемника хватает для проведения непрерывных наблюдений в течение 16 часов (продолжительность самой длинной зимней ночи плюс время на калибровки). Для охлаждения приемника с комнатной температуры до выхода в рабочий режим требуется несколько часов. При этом резкое охлаждение приводит к образованию микротрещин в криостате и, как следствие, к появлению холодной течи и снижению ресурса приемника. Для продления ресурса ПЗС-матрицы и переводу НЭС в режим постоянной готовности мы планируем оснастить модуль светоприемника устройством непрерывной заливки жидким азотом.

Выводы

Набор технических решений, положенных в схему НЭС, оставляет возможность существенного увеличения всех характеристик, объединяемых понятием потенциального качества спектрографа $Q=RLN$. В работе [9], на основе опыта многолетней научной эксплуатации и поэтапной модернизации спектрографа, сделан вывод, что конструкция, содержащая десятки инновационных решений, оказалась удачной, и сохраняет возможности развития. Детально рассмотрены резервы параметров, составляющих Q , и намечены пути реализации этих резервов.

2. ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА АППАРАТУРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЙ БЫСТРОПЕРЕМЕННЫХ АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

2.1. Обзор и анализ современной литературы, обоснование выбора технических решений

Особое место среди изучаемых астрономических феноменов принадлежит транзиентным явлениям (объектам, процессам), чья продолжительность достаточно мала (по сравнению с характерными временами эволюции космических объектов). К ним относятся как стохастические вариации интенсивности излучения (вспышки) разных частот (от радио до гамма) уже известных астрономических объектов - Солнца, переменных звезд, активных ядер галактик, рентгеновских источников, так и вновь обнаруживаемые транзиенты — вспышки новых и сверхновых, гамма-всплески, быстрые радио всплески, гравитационно-волновые импульсы. (Подчеркнем, что упомянутые явления часто прежде всего регистрируются в радио, рентгеновском, гамма диапазонах, как вариации гравитационного потенциала, соответственно). Однако возможности понимания их природы, построения их моделей в определяющей степени обуславливаются обнаружением и исследованием их проявлений в оптическом диапазоне – оптических транзиентов.

К числу транзиентных событий относятся и нестационарные объекты, и явления в околоземном пространстве -- неподвижные (северные сияния, сверхмолнии), и движущиеся (кометы, астероиды, метеориты, спутники, космический мусор). Характерные длительности упомянутых явлений лежат в диапазоне от миллисекунд (гамма и радио всплески, гравитационно-волновые импульсы, сверхмолнии) до минут-недель (транзиты экзопланет, вспышки переменных, новых и сверхновых звезд, ядер галактик).

Очевидно, что регистрация такого рода нестационарных событий возможна при непрерывном мониторинге небесной сферы высокого временного разрешения (во всех диапазонах электромагнитного спектра, а также с помощью гравитационных и нейтринных детекторов) и анализе данных в реальном времени. С другой стороны, для детального исследования этих явлений (объектов) необходимо как можно более быстрое подключение к их наблюдениям максимально крупных наземных оптических инструментов, снабженных аппаратурой высокого временного разрешения.

Необходимость решения множества сформулированных выше задач привела к возникновению нового направления в астрономии – Time Domain Astronomy. На сайте соответствующей рабочей группы МАС (<http://timedomainastronomy.net>) приводятся сведения о 62 инструментах, исследующих переменные объекты. Их характеристики весьма разнообразны: апертуры телескопов меняются от 40 мм (Kelt North) до 6.7 м (строящийся LSST), поля зрения — от десятков угловых минут (например, Super-LOTIS) до сотен квадратных градусов (Pi of the Sky). И все это впечатляющее разнообразие инструментов нацелено на массовое детектирование и исследование переменных объектов во Вселенной. Сколь объемен список телескопов, столь же широк и диапазон конкретных задач, для решения которых предназначены эти инструменты. Сюда входят наблюдения метеоров, комет и астероидов (угрожающих, в том числе), искусственных спутников, космического мусора, поиски эффектов микролинзирования (например от экзопланет), изучение переменных звезд -- от новых до мирид, исследования оптических послесвечений гамма-всплесков и поиски оптических вспышек,

синхронных с всплесками, поиски сверхновых, изучение вариаций блеска ядер галактик. В настоящее время одной из важнейших задач наблюдательной астрофизики являются поиск и исследование оптических компаньонов быстрых радиовсплесков и гравитационно-волновых импульсов, особенно в связи с обнаружением события GW170817, обусловленного слиянием двух нейтронных звезд (PhysRevL,119,16,201), которому сопутствовала вспышка электромагнитного излучения, правда, в гамма-диапазоне. Продолжительность таких событий лежит в диапазоне от миллисекунд до нескольких секунд, однако послесвечение, с ними связанное (оптическое, в том числе) может продолжаться месяцы.

Последнее обстоятельство обуславливает необходимость подключения к наблюдениям этих явлений крупных оптических телескопов, снабженных разнообразной аппаратурой. В то же время, поскольку основные по мощности процессы разыгрываются на короткой временной шкале, и эти наблюдения должны начинаться как можно раньше.

Именно для решения этой задачи предполагается создание в САО РАН фотоспектрополяриметра высокого временного разрешения для постоянного размещения в фокусе Н1 6-метрового телескопа. Этот прибор должен быть полностью автоматизированным комплексом, способным обеспечивать прием данных о наблюдаемом объекте, управление телескопом при наведении на него, выбор режима на основании начальной информации, обработку данных в реальном времени, коррекцию режима с ее использованием, прекращение наблюдений. При этом предполагается обеспечить несколько мод наблюдений для получения максимума характеристик излучения объекта (спектральных, поляриметрических, фотометрических) с высоким временным разрешением, по крайней мере, на уровне субсекунд. Эти соображения позволяют конкретизировать требования, которым должен отвечать проектируемый прибор.

1. Постоянство установки на телескопе.
2. Достаточно большое поле зрения, причем, при наведении с использованием подсмотра - на уровне 2-3' (поскольку координаты обнаруженного в различных обзорах переменного источника (транзиента) часто имеют невысокую точность), а при исследовании — на уровне 1', что позволяет повышать отношение «сигнал-шум», регистрируя изображение объекта, а не поток его излучения (в приборах с дифрагмами), а также одновременно наблюдая объект сравнения. Последнее обстоятельство весьма существенно при изучении стохастической переменности.
3. Реализация различных мод (режимов) наблюдений (фотометрия, спектроскопия, поляриметрия) при их одновременном использовании или быстрой смене для получения максимума информации об излучении объекта.
4. Высокое временное разрешение, по крайней мере, на уровне долей секунды, а в идеале — до долей миллисекунды. Напомним, что длительность и тонкая временная структура некоторых транзиентов (гамма и гравитационно-волновые события, радио барстеры), а также шкала переменности нестационарных источников (пульсары, рентгеновские системы) достигают долей миллисекунды.
5. Обработка и анализ данных в реальном времени для оперативного управления процессом наблюдений, выбора и смены их режимов, передачи информации в сети.
7. Интеграция информационной структуры прибора с компьютерным кластером 6-метрового телескопа для управления последним в реальном времени на основании результатов наблюдений.
8. Включенность в мировые информационные сети для оперативного обмена информацией с другими наземными и космическими инструментами.
9. Полная автоматизация прибора на основе специализированного мат.обеспечения, позволяющего реализовать все этапы функционирования аппаратуры без вмешательства оператора.

Как мы отмечали выше, в настоящее время свыше 60-ти телескопов различных размеров ориентированы на поиск и исследование нестационарных объектов и явлений. Тем не менее инструменты, отвечающие всему набору сформулированных требований отсутствуют. Рассмотрим некоторые из использующихся инструментов высокого временного разрешения, устанавливаемых на крупных телескопах. На телескопе GTC (10.4 м) (<http://www.gtc.iac.es/>) в универсальном приборе OSIRIS для наблюдений в оптическом диапазоне, смонтированном в фокусе Нэсмит-В, реализованы два режима, указанные как скоростные, - быстрая фотометрия (fast photometry) и фотометрия с переносом кадров (frame transfer photometry). Несмотря на большое исходное поле зрения (7.8 x 8.5 угл.мин.) и большой формат мозаики Marconi CCD44-82 (2x2048x4096 пкс) в первом режиме используется 3- секундная щель, единственный из пяти Слоановских фильтров, а временное разрешение составляет 12 секунд. В режиме переноса кадров поле имеет большие размеры (7x3.5 угл.мин.), однако также используется единственный (из пяти) фильтр при временно разрешении 4.3 секунды. И наконец, в этом инструменте не предусмотрена смена режимов в процессе наблюдений.

Здесь же установлен в качестве гостевого прибора инструмент HiPERCAM – панорамная система, состоящая из 5 матриц Teledyne E2V CCD231-42, на которых строится изображение поля размером 2.8x1.4 угл.мин, разделенное четырьмя дихроичными фильтрами на 5 компонент, в пяти слоановских полосах (Dhillon et al. 2018, astro-ph:1807.00557). Этот инструмент позволяет проводить синхронную фотометрию в указанных фильтрах с временным разрешением вплоть до 1 мс (при 6-кратном бинировании и редукации поля до размера 24x24 пикселя). Он может быть установлен и на телескопах меньших размеров, WHT (4.3м) и NTT (3.6м), с увеличением поля зрения. Тем не менее HiPERCAM нельзя признать соответствующим приведенным выше требованиям. Прежде всего, он не предназначен для стационарного размещения, а является «кочующим» прибором, ориентированным только на многополосную фотометрию. Его мат. обеспечение не направлено на анализ данных и смену режимов (скажем, временного разрешения) в реальном времени, а также реализацию роботического режима функционирования. Несколько фотометров высокого временного разрешения установлены на телескопах SAAO (Южно-Африканская Астрономическая Обсерватория) (<https://www.sao.ac.za>). На телескопе SALT (10.1м) используется координатно-чувствительный детектор BVIT (Siegmund et al. 2008, AIP Conference Proceedings 984, 103) с полем зрения 1.9 угл.мин., чувствительностью около 16% и временным разрешением 0.25 мкс. Однако этот прибор снабжен лишь набором различных фильтров и функционирует как одноканальный панорамный фотометр, как и его копия, установленная на метровом телескопе Ликской обсерватории. Эти инструменты не могут функционировать в автоматическом режиме. В SAAO имеется также быстрый панорамный фотометр SHOC (Correjas et al., 2013, PASP, 125, 976) используемый на телескопах 1.9м, 1м и 0.75м, где детектором служит мегапиксельная EMCCD – матрица с полем 1-3 угл.мин. и предельным временным разрешением 10 мс (при бинировании и редукации поля). Аналогичный прибор (MORIS) установлен на 3-метровом телескопе NASA IRTF (Мауна Кеа). Все эти системы не автоматизированы, не обладают набором режимов, не могут получать максимум информации разного рода о быстропеременных объектах. Совсем недавно был установлен на 5-метровом Паломарском телескопе инструмент CHIMERA (The Caltech High-speed Multi-colour camERA), являющийся двухканальным панорамным фотометром на базе двух EMCCD-матриц, позволяющих одновременно регистрировать излучение в двух полосах синего и красного диапазонов с временным разрешением от 40 до 1 мс (Harding, 2016, MNRAS, 457,3036). Здесь явно не хватает спектральной и поляризационной мод, а также автоматизации их смены. В то же время панорамный поляриметр GASP, измеряющий синхронно 4 параметра Стокса, используя также две EMCCD-матрицы (Collins,

2016, ExpAstron, 36, 479). В этой конфигурации временное разрешение может достигать 2.5 мс, а при замене матриц на восемь лавинно-пролетных диодов — до микросекунд. К сожалению ни спектральная мода, ни фотометрическая с одновременной регистрацией излучения разных диапазонов в этом приборе не реализованы, как и его автоматизация.

Упомянем также используемые на разных телескопах фотометры на базе лавинно-пролетных диодов (SPAD) (Kanbach et al. 2008, AIP Conf Ser, 984, 32; Meddi et al. 2012, PASP, 124, 448; Barbieri et al. 2009, JMO, 56, 2-3, 261) и сверхпроводящих детекторов (Romani et al., 2001, ApJ, 563, 221; Verhoeve et al., 2006, NIMA, 559, 598; Mazin et al., 2013, PASP, 125, 1348). В последнем случае речь идет о спектроскопии низкого разрешения, на основе прямого измерения энергии отдельных фотонов. Несомненно этому классу приемников принадлежит будущее, - в частности, такие инструменты планируются использовать на 39-метровом телескопе E-ELT (Mazin, 2019, astro-ph: 1908.02775). Однако оба типа этих детекторов состоят из небольшого числа элементов (максимум — 200x200), что существенно затрудняет их использование для обнаружения слабых оптических источников с координатами невысокой точности.

Таким образом, в настоящее время нет приборов, соответствующих сформулированным выше требованиям для инструментов, ориентированных на детальное исследование вновь обнаруженных нестационарных явлений и процессов (разумеется, сюда относятся и стохастические проявления активности известных источников излучения). Предлагаемый нами проект предназначен для решения именно этой задачи.

2.2. Содержание проекта

В панорамном фотоспектрополяриметре фокуса Н1 в значительной степени должна быть реализована оптико-механическая схема фотоспектрополяриметра первичного фокуса МРРР. В то же время, учитывая необходимость реализации автоматического режима работы прибора, в его конструкцию будет внесен ряд существенных упрощений, но и дополнений.

Реализация функции компенсации вращения поля. В настоящее время в фокусах Нэсмита на балконах БТА она отсутствует, однако ее необходимость принципиально важна при наблюдениях с длительным накоплением данных. Так, наши эксперименты показали, что в нынешней конструкции положение объекта должно корректироваться в ручном режиме каждые 3-5 минут в зависимости от его зенитного расстояния, что неприемлемо для любого автоматизированного прибора. Для обеспечения компенсации вращения поля в фокусе Н1 в рамках проекта приобретена поворотная платформа компании «СТАНДА» 8MRB150-350-60, характеристики которой позволяют полностью обеспечить неподвижность поля зрения телескопа.

Адаптация оптической схемы фокуса Н1. Поскольку конструкция разрабатываемого прибора близка к таковой у фотоспектрополяриметра первичного фокуса (Plokhotnichenko et al., 2009, Astrophysical Bulletin, 64, 3, 308), необходимо редуцировать фокальное расстояние для фокуса Н1 со 180 метров до 24 метров (прямой фокус). При этом адаптер светосилы должен быть ахроматическим и обеспечивать достаточно однородное рабочее поле размером не менее одной угловой минуты.

Фотоспектрополяриметр будет состоять из бокса сменных блоков, системы подсмотра и поляриметрического узла. Внутри бокса должен быть размещён узел с набором UBVR фильтров.

Система подзора содержит зеркально-щелевой узел с щелью переменной ширины, направляющий входящий пучок на видеокамеру подзора, который проходит через сверхсветосильную сборку из объективов Индустар-11 и РО-109, укорачивающую фокусное расстояние телескопа до 14 м и имеющую поле зрения около 2'. После этого узла на оптической оси прибора будет размещен входной объектив коллиматора с фокусным расстоянием 5 см и полем зрения диаметром 1' Carl Zeiss Jena Biotar 1.4/50. Створки щелевого узла должны иметь квадратный вырез на линии их смыкания, соответствующий по размеру этому полю, который устанавливается на оптическую ось при широкопольных наблюдениях. В этом режиме возможно проводить фотометрию в UBVR полосах системы Джонсона.

Для информационного обеспечения функционирования фотоспектрополяриметра используются три компьютера. Первый обеспечивает управление оптико-механическими узлами прибора, анализом поступившей информации и выбором режимов наблюдений, по сути являясь интеллектуальным центром инструмента. Второй принимает информацию от системы подзора. Третий функционирует на линии с фотометрической EMCCD камеры.

После изготовления макетной версии прибора последует этап отладки системы автоматического проведения наблюдений и приобретения необходимого опыта в автоматическом переключении режимов.

На втором этапе создания фотоспектрополяриметра будут изготовлены поляризационный блок двойной призмы Волластона и разводящих оптических клиньев, а также спектральная призма Аббе, как дополнительный цветоделительный узел к оптическому блоку с дихроичным зеркалом. Эти блоки будут размещены в боксе с лифтовой системой для их перемещения (смены). В минимальной конфигурации прибора, кроме камеры подзора, будет использоваться одна EMCCD-камера, на фотокатод которой будут строиться изображения поля в одном или двух фильтрах при отсутствии в пучке поляризационной призмы либо в этих же фильтрах по четыре изображения объекта при использовании призмы. Эти измерения должны выполняться либо с диафрагмой размерами 10" x 10", сформированной створками щели (по ширине) и рамкой за ней (по высоте), либо в широком поле (1' x 1') квадратного окна в створках щели. Выбор вариантов наблюдений определяется предварительной информацией об объекте и анализом результатов его регистрации камерой подзора, полученных в реальном времени. На основании этих данных выбирается способ дальнейших наблюдений — яркий объект может наблюдаться в варианте спектрополяриметрии, слабый — в режиме двухполосной (однополосной) фотометрии.

После тестирования минимального варианта конфигурации прибора и при небольшом дополнительном финансировании (300-500 т.р.) возможна установка дополнительного канала высокого временного разрешения в виде координатно-чувствительного детектора (КЧД) с микросекундным мертвым временем. При этом уже используемая EMCCD будет обеспечивать временное разрешение от 0.1 с до 1 мс.

3. ПРОЕКТ СОЗДАНИЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ШИРОКОФОРМАТНЫХ МАЛОШУМЯЩИХ КМОП-ФОТОПРИЕМНИКОВ

3.1. Обзор современного состояния в области создания широкоформатных фотоприёмных устройств на основе КМОП-фотоприёмников

Фото- и видеокамеры на основе КМОП-фотоприёмников получили в настоящее время широкое применение во всех сферах деятельности. Фотоприёмное устройство (ФПУ) для астрономического и научного применения содержит матричный светоприёмник, который с целью получения предельной чувствительности охлаждается до низких температур (типично $-20..-80^{\circ}\text{C}$ для КМОП-приёмников). ФПУ формирует, а затем пересылает кадры изображения на управляющий компьютер с помощью высокоскоростного интерфейса связи.

Отличительной особенностью данной разработки является применение в ФПУ широкоформатного быстродействующего КМОП-фотоприёмника с предельно низким шумом считывания.

Низкий шум считывания необходим для регистрации слабых световых потоков в астрономических применениях. Охлаждение фотоприёмника способствует снижению термогенерационных шумов. Обычно для охлаждения приёмника на несколько десятков градусов относительно температуры окружающей среды используются термоэлектрические холодильники на основе элементов Пельте. Достижимый в современных КМОП-фотоприёмниках среднеквадратичный уровень шума считывания измеряется единицами электрон.

Большой размер кристалла фотоприёмника (диагональ 50..90 мм) позволяет получить большой формат изображения при большом размере пикселя (от 8×8 мкм и выше). Большой размер пикселя в свою очередь позволяет накопить большее количество фотоэлектронов, что обеспечивает высокое значение динамического диапазона, также необходимого при астрономических наблюдениях.

Высокая скорость считывания кадров (десятки кадров в секунду) позволяет регистрировать быстропротекающие процессы. При этом генерируемый фотоприёмником такого класса поток видеоданных может достигать нескольких десятков Гбит/с.

Технологии КМОП-фотоприёмников и камер на их основе широко развиты в настоящее время во всех областях применения. Существуют десятки фирм, производящих КМОП-приёмники и сотни фирм, производящих камеры на их основе. Но КМОП-приёмники, которые могли бы отвечать одновременно всем специфическим требованиям астрономического применения – а именно: большеформатные быстродействующие КМОП-фотоприёмники с высокой квантовой эффективностью и низким шумом считывания – только в последние годы начали появляться на рынке. В течение последних 10 лет в мире активно ведётся работа по созданию КМОП-фотоприёмников такого класса. По формату, квантовой эффективности и шуму считывания эти приборы почти достигли уровня ПЗС-приёмников. В то же время частота считывания кадров у них выше в десятки раз. Появление КМОП-приборов с засветкой с обратной стороны подложки (*BSI, Backside Illumination*) также существенно повышает чувствительность фотоприёмных устройств – как за счёт уменьшения потерь света в самом приёмнике, так и за счёт расширения спектрального диапазона принимаемого излучения в красной и ближней ИК (инфракрасной) областях спектра.

Важным достоинством использования КМОП-приборов является возможность отказаться от медленного механического затвора, используя электронный затвор. Тем самым существенно возрастает временная и координатная точность регистрации.

Первые приборы такого класса были разработаны фирмой *BAE Systems Imaging Solutions* (ныне *Fairchild Imaging*, США) [11] и предназначались для военных применений. В настоящее время фирмы *Teledyne E2V1* (Великобритания) и *GPixel Inc2* (КНР) являются лидерами в разработке КМОП-фотоприёмников такого класса. Коммерчески доступны на данный момент для астрономических применений КМОП-приёмники с засветкой с обратной стороны типа *CIS113z* [12] фирмы *Teledyne E2V* и *GSense4040₄*, *GSense6060BSI₅* фирмы *GPixel*. В таблице 3.1.1 приведены характеристики КМОП-приборов в сравнении с ПЗС-приёмниками *Teledyne E2V CCD42-90* и *Kodak KAF-4320E*, применяемые в настоящее время в разработанных в CAO РАН фотоприёмных устройствах для задач обзора неба.

Таблица 3.1.1 – Сравнительные характеристики КМОП- и ПЗС-приёмников

Приёмник	CCD42-90	KAF-4320E	CIS113	GSense6060 (BSI)
Технология	ПЗС		КМОП	
Формат, пиксели	2048 × 4612	2048 × 2048	1920 × 4608	6144 × 6144
Размер пикселя, мкм ²	13,5 × 13,5	24 × 24	16 × 16	10 × 10
Фотоприёмная область, мм ²	27,6 × 62,2	50 × 50	30,7 × 73,7	61,44 × 61,44
Максимальная квантовая эффективность, %	80	65	95 (на длине волны 550 нм)	
Шум считывания, e ⁻	2,5...10	20	3	4,6
Частота кадров, кадр/с	0,25	2	2	44 @12 бит 14 @14 бит
Динамический диапазон	40 000	22 000	8000	2000...5000
Стыкуемость	3-сторонняя	нет	3-сторонняя	нет

Приборы серии *GSense* более доступны для приобретения, имеют существенно меньшую цену и более просты для реализации управления ими при сравнимых характеристиках с прибором *CIS113*, поэтому в данной разработке предпочтение было отдано им.

В 2019 году на рынке появились ФПУ на основе приёмников *GSense4040₆₇₈*. Тем не менее, эти камеры не соответствуют по ряду требований для астрономических применений, прежде всего климатических, в связи с чем данная разработка имеет важные преимущества. ФПУ на основе приёмников *GSense6060* также анонсированы тремя компаниями^{9,10,11} но они еще реально не вышли на рынок.

1 www.teledyne-e2v.com

2 <https://gpixel.com/>

3 <https://www.teledyne-e2v.com/markets/space/astronomy-imaging/cis113/>

4 <https://gpixel.com/products/area-scan-en/gsense4040/>

5 <https://gpixel.com/products/area-scan-en/gsense6060bsi/>

6 <https://www.tolgaastro.com/fli-kepler-4040-cooled-scmos-cameras.html>

7 <https://www.qhyccd.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=138&id=50>

8 <https://www.npk-photonica.ru/product/18378/>

9 <https://www.tolgaastro.com/fli-kepler-6060.html>

3.2. Задачи проектирования

Планируется разработать два фотоприёмных устройства (КМОП-ФПУ) на основе матриц производства фирмы *GPixel*: одно – с матрицей *GSense4040* (ФПУ4040) и второе – с матрицей *GSense6060* (ФПУ6060). На первом этапе в настоящем проекте ставится задача создания камеры с КМОП-фотоприёмником несколько меньшей площади – *GSense4040* форматом 4096×4096 пикселей. Это позволяет реализовать вариант более дешёвой камеры с менее чувствительным приёмником, но имеющей большую частоту считывания кадров – до 96 кадр/с.

КМОП-матрица *GSense4040* с фронтальной засветкой (*FSI, Front Side Illumination*) поставляется в двух исполнениях: *СМТ* – с микролинзами и антибликовым покрытием, *СМН* – без микролинз.

Основные характеристики фотоприёмника:

- формат – 4096×4096 пикселей;
- размер пикселя – 9×9 мкм²;
- фоточувствительная область – $36,9 \times 36,9$ мм²;
- шум считывания – $3,7 e^-$;
- квантовая эффективность – $< 74\%$ (для версии *СМТ*);
- динамический диапазон – 86 дБ;
- темновой ток – $0,1 e^-/с/пиксель$ при температуре $-30^\circ C$;
- частота кадров – 24 кадр/с при бининге 1×1 , 96 кадр/с при бининге 2×2 .

При техническом проектировании ФПУ были приняты следующие приоритетные положения:

- обеспечение выполнения технических требований при минимизации аппаратно-программных затрат посредством нахождения эффективных архитектурных решений, унификации физического и программного интерфейсов ФПУ с существующими решениями, унификации схемной реализации модулей контроллера для минимизации ассортимента радиоэлементов;
- обеспечение надёжности проектирования за счёт использования и модернизации преимущественно уже испытанных технических решений.

Отличительной особенностью разрабатываемого фотоприёмного устройства является высокая производительность формирования и передачи цифровых изображений – до 30 Гбит/с. При этом, должна быть реализована гарантированная пропускная способность для всего канала передачи данных. Такая полоса пропускания должна обеспечиваться интерфейсом между камерой и компьютером сбора данных, внешними и внутренними шинами компьютера, интерфейсом к дисковой системе хранения и самой дисковой системой.

Основными трудностями при реализации проекта являются сложность управления КМОП-прибором и обработка, передача и сохранение огромного генерируемого потока видеоданных, достигающего 30 Гбит/с при непрерывном считывании. Для решения данной проблемы планируется использовать опыт, полученный при реализации контроллера типа *DINACON-5* для мозаичных ПЗС-приёмников, в котором управляющий компьютер соединяется оптоволоконной линией связи с общей производительностью 10 Гбит/с. Также в настоящем проекте наследуются отдельные технические

10 <https://www.ximea.com/en/products/cameras-filtered-by-resolution-and-sensors/high-resolution-large-scmos-sensor-gpixel-gsense6060-camera>

11 <https://www.qhyccd.com/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=138&id=53>

решения и опыт проведенных ранее в САО РАН разработок ФПУ, проверенные методологически и практически. В связи с этим многие технические решения для реализации фотоприёмной камеры и контроллера не нуждаются в экспериментальных проверках, а упор в разработке делается на проблемы, специфичные для данной конкретной задачи.

Задача создания фотоприёмной системы включает несколько подзадач – конструирование крупноформатной фотоприёмной камеры с термоэлектрическим охлаждением, разработка контроллера с высокой производительностью и разработка эффективного программного обеспечения.

Учитывая указанные особенности, проект разработан в следующей последовательности:

- в первую очередь анализируются и выбираются тип интерфейса «камера-компьютер» и соответствующие технические средства ввода изображений, которые будут в значительной степени определять конструкцию ФПУ и концепцию построения программного обеспечения;
- затем анализируются и выбираются архитектуры высокопроизводительных промышленных компьютерных систем, которые должны быть учтены при построении программной модели системы, и совместимые с выбранными средствами ввода изображений;
- разрабатывается архитектура контроллера и программного обеспечения;
- обсуждается и выбирается тип охлаждающего устройства, определяющий конструкцию криостатируемой камеры;
- на основе проведённого анализа и выбора технических решений описывается разработанная конструкция ФПУ.

3.3. Анализ и обоснование выбора технических средств ввода цифровых изображений

В настоящее время насчитывается около 300 производителей камер с использованием различных типов приёмников изображения, сопутствующего оборудования и комплектующих изделий, предназначенных для гражданского и промышленного применения. Производители объединены в ряд ассоциаций, из них крупнейшими являются *Automated Imaging Association (AIA)* и *European Machine Vision Association (EMVA)*. Целью этих объединений является согласованная разработка стандартов на различные компоненты систем машинного зрения, методов тестирования электро-оптических характеристик и унификации их описания.

Одним из важных направлений деятельности ассоциаций является стандартизация интерфейсов между камерами и управляющими компьютерами для производства совместимых технических и программных средств машинного зрения. Сейчас общепринятыми для промышленных камер являются четыре типа стандартных интерфейсов: *Camera Link*, *GigE Vision*, *FireWire* и *USB*. Существуют и нестандартные способы реализации камерных интерфейсов с использованием *LVDS* в сочетании со специализированными устройствами захвата изображения (фреймграбберами), но они достаточно быстро вытесняются с рынка, как несовместимые с широким спектром унифицированных устройств.

В табл. 3.3.1 приведены данные по новым стандартам перспективных высокопроизводительных интерфейсов нового поколения, которые появились в 2010–2017 гг. Стандарт *CoaXPress* поддерживает ассоциация *JIA (Japan Industrial Imaging Association)*, а *Camera Link HS*, *GigE Vision* и *USB 3.1 Vision* – соответствующие комитеты *AIA*.

Таблица 3.3.1 – Сравнительные характеристики стандартов машинного зрения, используемых в задачах контроля промышленных процессов

Характеристика/ Стандарт	USB 3.1 Vision	CoaXPress 1.0	GigE Vision 2.1	Camera Link HS 1.1
Производительность, Мбайт/с	625	3125	120, 1200, 4800	1200 - 6000
Тип кабеля	витая пара	коаксиальный	витая пара, оптоволокно	витая пара, оптоволокно
Макс. длина, м	5	105	100 - Cat-7, 100 – многомодовое волокно	15 на CX-4, 300 – многомодовое волокно
Проверка целостности данных	CRC	CRC	CRC/пересылка	CRC/пересылка
Синхронизация	Нет	Есть	Есть	Есть
Питание через кабель, W	Есть	13 на 1 кабель	13, 25 (витая пара)	Есть
Стоимость	низкая	высокая	высокая	средняя
Сложность	низкая	высокая	высокая	средняя
Статус стандарта	Международный	Международный	Международный	Международный
Наличие изделий на рынке	есть	есть	несколько наименований	несколько наименований

Сравним возможности описанных выше стандартных технологий машинного зрения промышленного назначения по следующим критериям: пропускная способность и длина кабеля, представленность на рынке, сложность реализации камерных интерфейсов.

USB 3.1 Vision. Стандартный компьютерный интерфейс *USB 3.1* также нормируется промышленным стандартом в сфере машинного зрения – стандартом *USB 3.1 Vision*. Этот стандарт, который был официально введен в действие в 2015 г., является официальным стандартом, регулирующим применение интерфейса *USB 3.1* в индустрии обработки изображений. Преимуществом этого решения является простота подключения камеры к компьютеру, поэтому он широко распространяется. Однако ни по производительности, ни по длине кабеля этот стандарт не соответствует требованиям данного проекта.

CoaXPress. Стандарт использует специализированные фреймграбберы в компьютере (рисунок 3.3.1) и коаксиальные кабели в качестве среды физической передачи. Стандарт *CoaXPress 1.0* поддерживает скорость передачи до 6,25 Гбит/с на коаксиальный кабель, таким образом, через 4 кабеля производительность составит 25 Гбит/с. Стандарт *CoaXPress 2.0*, вышедший в 2019 г., удваивает скорость передачи.



Рисунок 3.3.1 – Фреймграбберы стандарта CoaXPress

На рынке имеется около десятка фреймграбберов стандарта *CoaXPress* 1.0¹². Стоимость их высока из-за малой популярности стандарта. Также необходима покупка специализированного *IP*-ядра, реализующего интерфейс на стороне контроллера камеры. Поэтому данный стандарт не является предпочтительным для реализации в данном проекте.

Camera Link HS. Стандарт использует специализированные фреймграбберы (рисунок 3.3.2) в компьютере, многожильные и оптоволоконные кабели в качестве среды физической передачи.



Рисунок 3.3.2 – Фреймграбберы стандарта Camera Link HS

Пропускная способность:

- от 1200 до 1850 МБ/с (*X* протокол) оптоволоконно *F2*, дистанция 300+ м (разъём *SFP+*);
- от 2100 до 3300 МБ/с (*M* протокол) медный кабель *C2*, дистанция 15 м (разъём *CX4*);
- от 8400 до 10000 МБ/с (*X* протокол) медный кабель *C3*/ активное оптоволоконно, дистанция 100 м (разъём *CX4*) ;
- максимально 8 кабелей.

На рынке присутствует несколько компаний, выпускающих достаточный ассортимент фреймграбберов стандарта *Camera Link HS*¹³. Стоимость модулей достаточно высока, так как кроме собственно интерфейса, адаптеры выполняют функции обработки и буферирования видеоданных. Необходимо также покупать специализированные библиотеки функций и оплачивать их дальнейшую поддержку.

GigE Vision. Стандарт *GigE Vision* последней версии 2.1 утвержден в 2015 г. Замечательной особенностью стандарта является применение сетевого интерфейса *Ethernet* для связи с удалёнными камерами, и, следовательно, со стороны компьютера используются широко распространенные адаптеры связи стандарта *Ethernet IEEE802.3*. Стандарт *GigE Vision* рассчитан на скорости обмена 1 и

¹² <http://jiia.org/en/cxp>

¹³ Например, <https://kayainstruments.com/komodo-ii-clhs-frame-grabber/>

10 Гбит/с. Средой передачи может быть как медный многожильный кабель, так и оптоволокно. При этом и длина кабелей будет соответствовать стандарту *Ethernet IEEE802.3*. Для функционирования обмена необходима разработка или покупка специализированного *IP*-ядра, реализующего интерфейс на стороне контроллера камеры, а также покупка или разработка программы, осуществляющей управление камерой на стороне компьютера.

За последние несколько лет появился существенный сектор рынка, ориентированный на *GigE Vision*¹⁴. В большей своей части это устройства, работающие на скорости 1 Гбит/с, так как большинству фотоприёмных камер высокая скорость не требуется и это позволяет использовать общие сети передачи данных для подключения камер. Скорость 10 Гбит/с используется пока в редких случаях и фактически является соединением типа «точка-точка» (камера-управляющий компьютер). Однако в последнем случае многие требования стандарта становятся избыточными, что позволяет значительно упростить реализацию протокола обмена на обеих сторонах интерфейса. Более того, в этом случае можно использовать для обмена более производительные линии связи и адаптеры со скоростью 40 Гбит/с стандарта *Ethernet 40GBASE-SR4*. Примером такого устройства является сетевой адаптер *Intel XL710-QDA2*¹⁵ (рис. 3.3.3), позволяющий подключать две оптоволоконные линии с производительностью 40 Гбит/с каждая.



Рисунок 3.3.3 – Адаптер Ethernet Intel XL710-QDA2

На основе проведённого анализа можно сделать вывод о том, что для реализации целей настоящего проекта на базе стандартных технологий машинного зрения предпочтение следует отдать стандарту *GigE Vision*. При примерно сравнимых характеристиках производительности и длине линий связи в сравнении со стандартом *Camera Link HS* определяющим фактором выбора является экономия средств. В этом случае отсутствует необходимость в покупке фреймграббера, специализированного *IP*-ядра и программы управления (драйвера). Однако при этом необходима самостоятельная разработка *IP*-ядра и управляющей программы, но при упрощении протокола обмена это вполне реализуемая задача (опыт такой разработки уже имеется).

3.4. Анализ и обоснование выбора компьютерной архитектуры системы ввода-вывода цифровых изображений

3.4.1. Введение

Ввод и накопление практически непрерывного интенсивного потока цифровых изображений в компьютерную систему на протяжении многих часов наблюдений требует детального рассмотрения

¹⁴ <https://www.visiononline.org/vision-standards-product.cfm>

¹⁵ <https://www.intel.ru/content/www/ru/ru/products/network-io/ethernet/10-25-40-gigabit-adapters/xl710-qda2-40gbe.html>

и выбора наиболее эффективной архитектуры ввода-вывода для реализации требуемой пропускной способности. Достаточно часто для решения подобных задач используются специализированные компьютерные системы класса *Data Recorder*, предназначенных для сбора большого объема данных. Их отличительной особенностью является наличие развитой системы скоростных внешних интерфейсов и коммутаторов внутренних шин, иногда значительной встроенной оперативной памяти (до 64 ГБайтов) для накопления данных в реальном времени без одновременной перезаписи их на дисковые накопители. Типичным из высокопроизводительных систем ввода является семейство *Vortex Data Recorders* компании *Curtiss-Wright* (США), выполняемое в стандартах промышленных *PC* (с процессорами *Dual Xeon* и операционной системой *Windows*) или в заказных вариантах в форм-факторах *VPX*, *VME*, *VXS* (с процессорами *PowerPC* и операционными системами *VxWorks/Linux*). Такие системы обеспечивают ввод данных с пропускной способностью до 10 Гбит/с (один канал 10 *GigE Ethernet* или 4 x *sFPDP*) с сохранением их в массиве *RAID* из 16 дисков общей емкостью до 7 ТБ.

Интересную технологию под названием *StreamStor* предлагает компания *Conduant*. Специализированный *PCI Express* модуль контроллера прямого подключения к диску (*Direct-to-Disk controller*) обеспечивает ввод и сохранение данных через шину *PCI* или *PCI Express* непосредственно из устройства ввода данных (*DAQ*), не затрагивая процессор и память (рисунок 3.4.1). *Conduant StreamStor16* может записывать или воспроизводить потоки данных в реальном времени со скоростью до 20 ГБ/с (160 Гбит/с или 1 ТБайт каждые 50 с) независимо от типа данных.

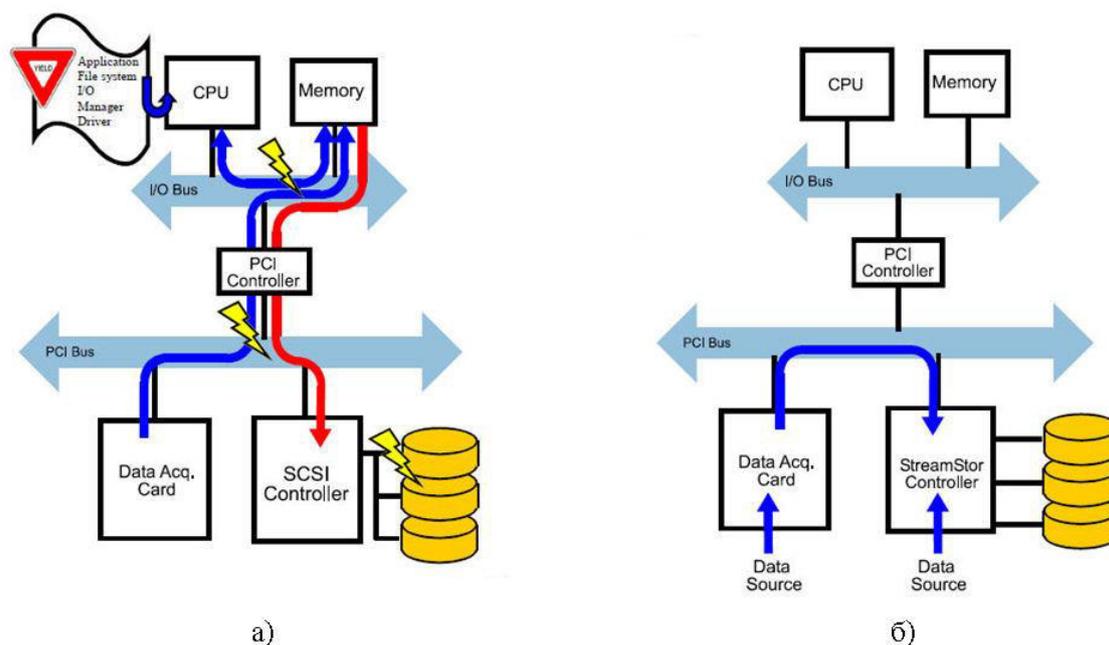


Рисунок 3.4.1 – Стандартный способ ввода и сохранения данных (а) и технология StreamStor Amazon (б)

К недостаткам систем типа *Data Recorder* следует отнести их узко-специализированные архитектуры, ограниченное число производителей и ограниченную номенклатуру изделий, что сильно привязывает потребителей к отдельно взятым производителям и не способствует гибкому развитию и модернизации систем сбора данных в процессе эксплуатации. Следует также отметить высокую стоимость продукции из-за узкого сектора рынка потребителей.

Мы руководствуемся следующими критериями выбора архитектурных решений, типов

¹⁶ <https://conduant.com/2019/11/adding-a-conduant-streamstor-recorder-to-a-xilinx-development-board/>

внутренних и внешних интерфейсов:

- архитектура системы ввода изображений должна обеспечивать пропускную способность не менее 30 Гбит/с от внешнего интерфейса до записи на дисковые массивы в непрерывном режиме и при пиковых нагрузках других подсистем: процессор-память, графической, сетевой и др.;
- тип внешнего интерфейса, определяющий выбор технических средств ввода, должен иметь жизненный цикл не менее 10 лет до момента его радикальной модернизации, когда обратная совместимость уже не будет поддерживаться;
- технические средства ввода должны иметь жизненный цикл не менее 8 лет до момента их радикальной модернизации, то есть при замене средств ввода должна быть обеспечена их программная и техническая совместимость;
- выбираемая компьютерная архитектура системы ввода изображений должна соответствовать требованиям к системам, работающим в некритических условиях эксплуатации.

В последние годы в компьютерных технологиях происходят качественные изменения, связанные с переходом от параллельных шин к скоростным последовательным шинам, что в значительной степени изменяет архитектуры компьютерных систем. В настоящее время *PCI Express* уже практически вытеснила все параллельные шины кроме *PCI-X*, которая еще продолжает применяться в серверных системах.

Кроме *PCI Express*, существует ещё ряд высокоскоростных стандартизованных последовательных интерфейсов: *HyperTransport*, *RapidIO*, *InfiniBand* и *StarFabric*. Сильной стороной стандарта *PCI Express* считается то, что он выступает прямым наследником интерфейсов на рынках высокопроизводительных ПК и серверов.

Ниже обсуждается современная технология *PCI Express (PCIe)*, как эффективного инструмента построения системы ввода изображений с длительным жизненным циклом.

3.4.2. Технология *PCI Express*

Интерфейс *PCI Express* основан на открытых стандартах и выступает как наследник *PCI* и его вариантов для систем ввода-вывода серверов и клиентских устройств. В отличие от *PCI* и *PCI-X*, основанных на 32- и 64-разрядной параллельной шине, *PCI Express* использует высокоскоростную технологию последовательного соединения, похожую на ту, что используется в *Gigabit Ethernet*, *Serial ATA (SATA)* и *Serial Attached SCSI (SAS)*. *PCI Express* отражает общую для компьютерной индустрии тенденцию замены параллельных общих шин на высокоскоростные последовательные соединения типа «точка-точка» (*point-to-point*).

Новая технология шины обеспечивает скорость передачи, которая будет достаточной с учетом развития процессоров и подсистем ввода-вывода, по крайней мере, в течение следующих 10 лет.

Технология *PCI Express* имеет следующие преимущества:

- высокая пропускная способность;
- последовательное соединение, обеспечивающее масштабирование производительности;
- отдельное соединение «точка-точка» для каждого устройства вместо общей шины *PCI*;
- малые задержки для серверной архитектуры;
- меньший размер разъемов и упрощенное проектирование систем;
- расширенные функции.

PCI Express предоставляет масштабируемую высокоскоростную последовательную шину ввода-вывода. Многоуровневая архитектура *PCI Express* (рисунок 3.4.2) поддерживает существующие приложения *PCI* и драйверы за счёт обратной совместимости с существующей моделью *PCI*.

3.4.2.1.1. Многоуровневая архитектура PCI Express

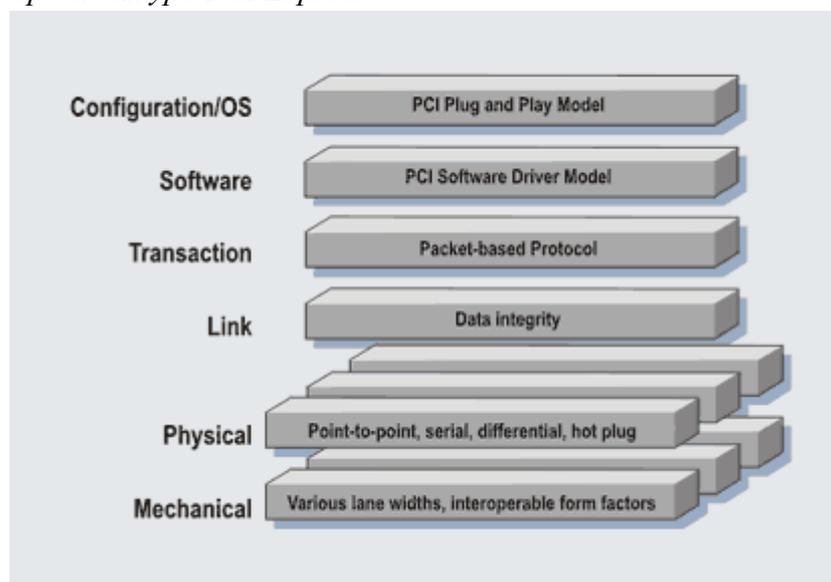


Рисунок 3.4.2 – Уровни архитектуры PCI Express

Уровень **Конфигурации/ОС** определяет стандартный механизм (в соответствии со спецификацией *PCI Plug-and-Play*) инициализации устройств, их нумерацию и конфигурирование.

Уровень **Программного обеспечения** генерирует запросы чтения и записи к периферийным устройствам. Модель инициализации *PCI Express* позволяет ОС обнаруживать новые аппаратные устройства и распределять ресурсы системы.

Уровень **Транзакций** читает и записывает запросы от уровня ПО к каналному уровню с помощью протокола на основе пакетов и обеспечивает соответствие ответных пакетов запросам ПО. Этот уровень поддерживает 32-разрядную и расширенную 64-разрядную адресацию памяти, адресное пространство *PCI* памяти, ввода-вывода и конфигурации, а также новое пространство сообщений для таких сообщений, как прерывания и сбросы.

Канальный уровень добавляет последовательность пакетов и обнаружение ошибок на основе циклических кодов избыточности (*CRC*) к пакетам данных, создавая надежный механизм передачи данных между чипсетом и контроллером ввода-вывода.

Физический уровень базируется на двойных однонаправленных каналах *PCI Express*. Это обеспечивает гибкость и позволяет использовать разные технологии и частоты. Благодаря такому подходу первоначальную кремниевую технологию можно будет со временем заменить инновациями, которые сохраняют обратную совместимость. Например, для повышения скорости передачи данных можно использовать оптоволоконную технологию.

Механический уровень определяет форм-факторы периферийных устройств.

Ширину пропускания канала *PCI Express* можно масштабировать за счёт добавления сигнальных пар для формирования нескольких линий между двумя устройствами. Спецификация поддерживает ширину линии x1, x4, x8 и x16.

3.4.2.1.2. Новые версии стандарта PCI Express

Развитием стандарта *PCI Express* занимается организация *PCI Special Interest Group (PCI-SIG)*. До недавнего времени на рынке преобладали материнские платы стандарта *PCI Express 3.0* с максимальной скоростью обмена 8 *GT/s* (Гигатранзакций/с/линию).

PCI Express 4.0. Спецификация *PCI Express 4.0* была опубликована в октябре 2017 г. По сравнению с *PCI Express 3.0*, максимальная скорость передачи данных по шине удвоена – с 8 до 16 *GT/s*. Кроме того, уменьшены задержки, улучшена масштабируемость и поддержка виртуализации. В

ноябре 2018 г. *AMD* объявила о планах выпуска в продажу в конце 2018 г. первого *GPU* с поддержкой *PCI Express 4.0 x16*.

PCI Express 5.0. В мае 2019 года появилась окончательная спецификация стандарта *PCI Express 5.0*. Скорость передачи данных по шине *PCI Express* составляет 32 *GT/s*. Для 4-х линий скорость передачи данных составляет 16 Гбайт/с, для 16-ти линий – 64 Гбайт/с.

Таблица 3.4.1 – Пропускная способность разных версий PCI Express

Версия PCI Express	Скорость передачи	Полезная полоса	Полоса на одну линию в одном направлении	Полная полоса на x16 каналов
PCIe 1.x	2,5 ГТ/с	2 Гбит/с	250 МБ/с	4 ГБ/с
PCIe 2.0	5,0 ГТ/с	4 Гбит/с	500 МБ/с	8 ГБ/с
PCIe 3.0	8,0 ГТ/с	8 Гбит/с	984,6 МБ/с	15,8 ГБ/с
PCIe 4.0	16,0 ГТ/с	16 Гбит/с	1,969 ГБ/с	31,5 ГБ/с
PCIe 5.0	32,0 ГТ/с	32 Гбит/с	3,938 ГБ/с	63 ГБ/с

3.4.2.2. Примеры архитектур с PCI Express

Рассмотрим, как технология *PCI Express* может быть реализована в различных системных архитектурах.

3.4.2.2.1. Клиентская архитектура

Первоначально канал x16 *PCI Express* заменил шину *AGP* между графической подсистемой и северным мостом. Вариант *PCI Express* может заменять и канал между обоими мостами. Предусмотрено также несколько каналов *PCI Express* от южного моста к контроллеру сетевого интерфейса (*NIC*), устройствам *IEEE 1394* и другой периферии. Южный мост будет по-прежнему поддерживать устаревшие слоты *PCI* (рисунок 3.4.3).

Такая архитектура подчеркивает несколько ключевых моментов. Настольные системы еще долго будут оснащаться шинами как *PCI*, так и *PCI Express*. Чтобы минимизировать путаницу, предусмотрена защита от ошибочной установки *PCI* в слоты *PCI Express* и карт *PCI Express* – в слоты *PCI*. Кроме того, *PCI Express* обеспечивает широкое применение карт *Gigabit Ethernet*, 10 *Gigabit Ethernet*, 1394b и других высокоскоростных устройств в клиентских системах. Он также поддерживает растущие требования к полосе пропускания графических подсистем.

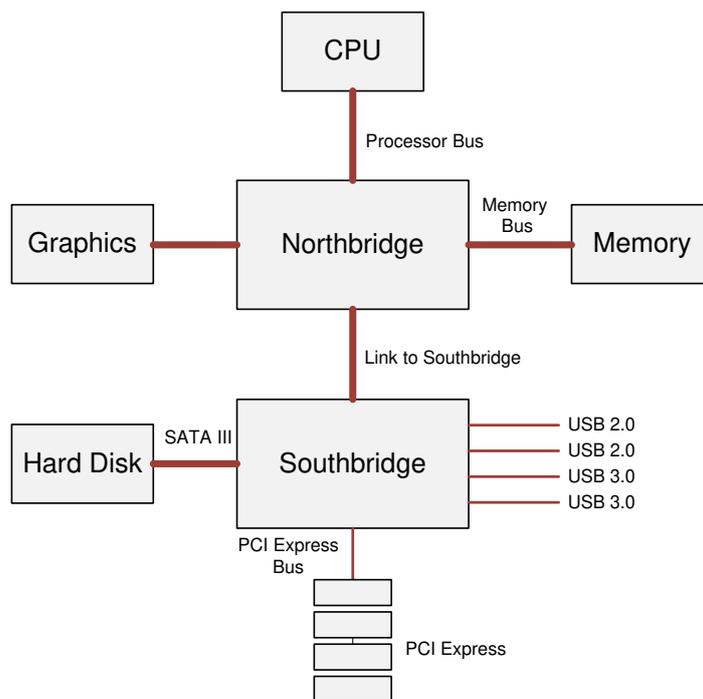


Рисунок 3.4.3 – Пример клиентской архитектуры

3.4.2.2.2. Серверная архитектура

PCI Express применяется в двухпроцессорной серверной архитектуре (рисунок 3.4.4), значительно упрощая систему. Каналы *PCI Express* для устройств ввода-вывода и слотов подключаются непосредственно к северному мосту. Такой подход дает ряд преимуществ. Во-первых, это высокая полоса пропускания для ввода-вывода нового поколения, например, 10 *Gigabit Ethernet* и фабрики x4 *InfiniBand*. Например, канал x4 *PCI Express* способен обеспечить пиковую полосу пропускания, которая требуется двухпортовому контроллеру 10 Гбит/с.

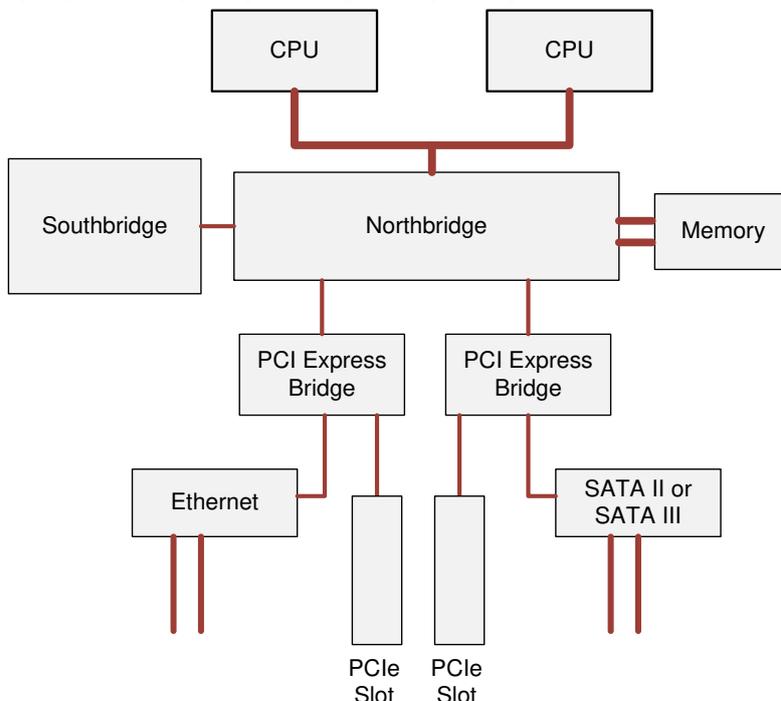


Рисунок 3.4.4 – Пример серверной архитектуры

Во-вторых, меньше становятся расходы на внедрение. Удастся подключить к системному набору микросхем больше слотов и встроенных устройств ввода-вывода, что уменьшает число микросхем моста и снижает требования к маршрутизации сигналов на системной плате. И, наконец, за счёт отказа от использования микросхемы моста *PCI-X* уменьшается запаздывание передачи между устройствами ввода-вывода и центральным процессором и памятью.

3.4.2.2.3. Архитектура платформы AMD X570

Чипсет *AMD X570* (рисунок 3.4.5) располагает 24 линиями интерфейса *PCIe 4.0*. Из них 16 выделены для графической подсистемы. С помощью внешних элементов эти линии можно будет использовать в одном слоте *x16* или в двух слотах *x8*. Кроме того, 4 линии выделены одному слоту *M.2 NVMe*. Оставшиеся линии служат шиной чипсета. Пропускная способность шины чипсета составляет до 64 Гбит/с. На контакты процессорного разъема также выведены линии встроенного контроллера вывода-вывода. Встроенный южный мост имеет два порта *SATA 6 Гбит/с*, один из которых переключается на первый слот *M.2*, и четыре порта *USB 3.x* с пропускной способностью 5 Гбит/с каждый. На процессорный разъем также выведена звуковая шина.

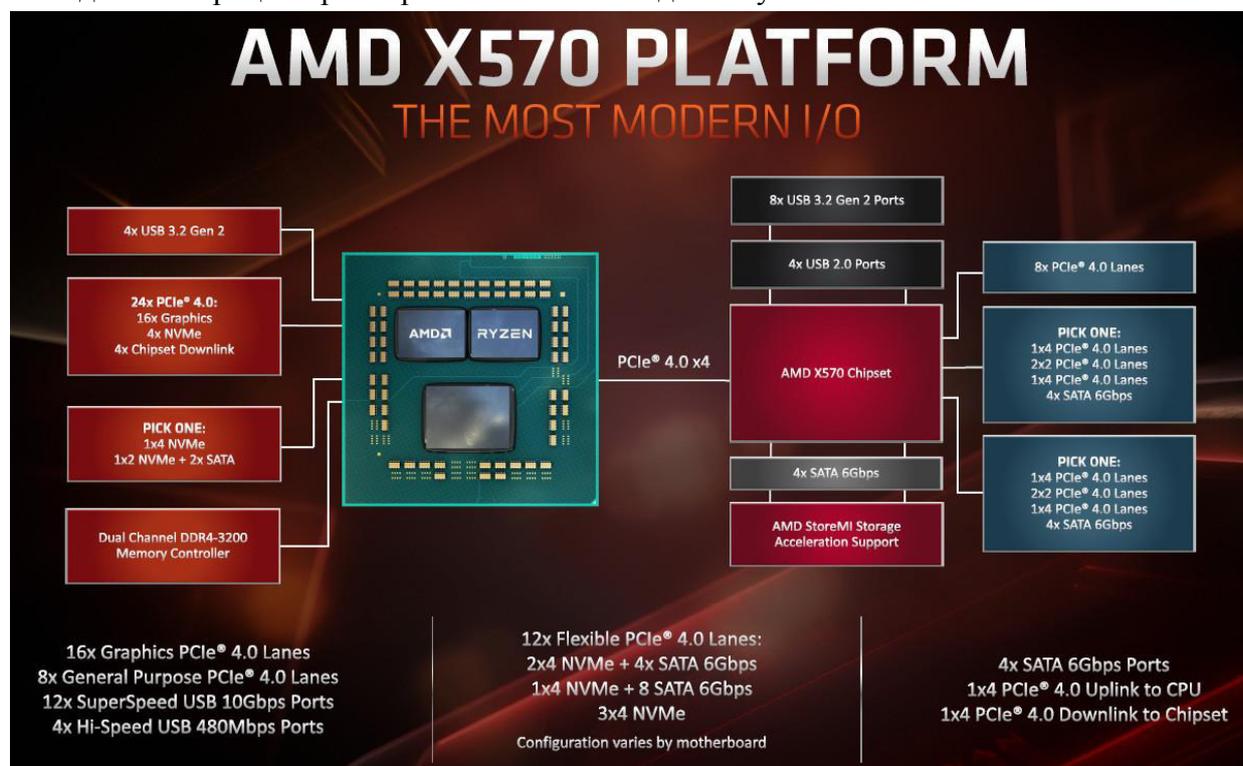


Рисунок 3.4.5 – Архитектура платформы AMD X570

В *AMD X570* устранен наибольший недостаток чипсета предыдущего поколения *X470* – нисходящее подключение *PCIe*. В *X570* есть 16 нисходящих линий *PCIe 4.0*. Два из них выделены двум слотам *M.2* с разводкой *x4* каждый, а остальные восемь – как линии *x1*. Три задействуются слотами *PCIe x1*, одна отдана контроллеру *ASMedia ASM1143*, который превращает порт 3.0 *x1* в два порта *USB 3.x Gen 2* (10 Гбит/с). Еще одна линия занята контроллером 1 *GbE*, одна – беспроводным адаптером. Кроме того, есть шестипортовый контроллер *SATA 6 Гбит/с* поддержкой *RAID*, четыре порта *USB 3.x Gen 1* (5 Гбит/с) и четыре порта *USB 2.0/1.1*.

3.4.2.3. Выводы

Таким образом, технология *PCI Express* обеспечивает надежное и масштабируемое последовательное соединение с наивысшей пропускной способностью в сравнении с другими последовательными шинами.

Использование современной серверной компьютерной архитектуры на платформе *AMD X570*

позволит реализовать в настоящем проекте прозрачную систему ввода и сохранения интенсивных потоков цифровых изображений.

3.4.3. Выбор системной платы и системы хранения

Материнские платы на чипсете *X570* выпущены всеми производителями в массовом порядке. В сочетании с процессорами *AMD Ryzen* 3-го поколения эти платы могут работать с пропускной способностью *PCIe* 4.0. Благодаря шине *PCIe Gen4* новейшие твердотельные накопители с интерфейсом *M.2* могут достигать высоких скоростей. Например, скорость последовательного чтения доходит до 5 ГБайт/с, поэтому большие объёмы данных передаются без малейших задержек.

Рассмотрим платы, доступные для приобретения в 2019 г. (таблица 3.4.2).

Таблица 3.4.2 – Системные платы на чипсете AMD X570

	Количество слотов <i>PCIe</i> 4.0	Число разъемов <i>M.2</i>	Сетевой интерфейс, Гбит/с	Стоимость
Gigabyte X570 Aorus Master	3	3	1 x2,5 + 1 x1	\$340
Gigabyte X570 Aorus Pro	2	3	1 x1	\$250
Gigabyte X570 Aorus Xtreme	3	3	2 x10	\$1000
Gigabyte X570 Aorus Ultra	2	3	1 x1	\$291
MSI MEG X570 Godlike	4	3	2 x10	\$610
MSI MEG X570 ACE	3	2	1 x2,5 + 1 x1	\$330
Asus ROG Crosshair VIII Hero	3	2	2 x2,5	\$340
Asus ROG Crosshair VIII Formula	3	2	2 x5	\$506
Asus ROG Strix X570-E Gaming	3	2	2 x2,5	\$280
ASRock X570 Taichi	3	3	1 x1	\$293

На материнских платах нет встроенного графического процессора, поэтому надо учитывать, что один слот *PCIe* будет занят графическим адаптером. Второй слот понадобится для интерфейсной платы связи с фотоприёмным устройством. Наличие третьего *PCIe* слота позволит использовать компьютер для других наблюдательных методов. Также желательно наличие на плате двух сетевых интерфейсов.

Материнская плата *Gigabyte X570 Aorus Master* (рисунок 3.4.6) в серии плат компании *Gigabyte* на наборе системной логики *AMD X570* представляет собой оптимальное сочетание требуемых параметров и функциональных возможностей со сравнительно невысокой стоимостью.



Рисунок 3.4.6 – Системная плата Gigabyte X570 Aorus Master

В таблице 3.4.3 представлены характеристики системной платы *Gigabyte X570 Aorus Master*.

Таблица 3.4.3 – Характеристики системной платы Gigabyte X570 Aorus Master

Процессорный разъем	<i>Socket AM4</i>
Поддерживаемые процессоры	<i>AMD Ryzen 2-го и 3-го поколений</i>
Чипсет	<i>AMD X570</i>
Память	<i>4×DDR4, до 128 ГБ, двухканальная</i>
Слоты расширения	<i>3×PCI Express 4.0/3.0 x16 1×PCI Express 4.0/3.0 x1</i>
Сетевой интерфейс	<i>Realtek 2,5 GbE + Intel Gigabit LAN</i>
Разъемы для накопителей	<i>6×SATA 6 Гбит/с (поддержка дисковых массивов RAID 0, RAID 1, и RAID 10) 3×M.2 (3xSATA / PCIe x4 / PCIe 4.0)</i>
Форм-фактор	<i>ATX (305×244 мм)</i>
Поддержка операционных систем	<i>Windows 10 x64</i>

Рассмотрим результаты тестирования¹⁷¹⁸¹⁹ новейших *SSD*-накопителей с интерфейсом *M.2* (таблица 3.4.4).

¹⁷ <https://www.ixbt.com/data/wd-ultrastar-dc-sn200-3200gb-test.html>

¹⁸ <https://www.ixbt.com/data/transcend-220s-1tb-test.html>

¹⁹ <https://www.ixbt.com/news/2019/03/28/viper-vpn100-pcie-3-0-x4.html>

Таблица 3.4.4 – Сравнение быстрых SSD-накопителей

	Ёмкость	Чтение, МБайт/с	Запись, МБайт/с	Запись 32 ГБ данных, МБайт/с
Gigabyte AORUS NVMe Gen4	2 ТБ	5 005,6	4 289,6	3 215,7
Western Digital Ultrastar DC SN200	3,2 ТБ	6 393,8	2 442,4	2 393,6
Samsung 970 Evo Plus	1 ТБ	3 566,7	3 459,8	2 410,2
Intel Optane SSD 905P	1,5 ТБ	2 720,3	2 720,3	2 091,3
Transcend 220S	1 ТБ	3 498,8	2 866,8	2 107,1
Patriot Viper VPN100	2 ТБ	3 100,0	3 000,0	-

SSD-накопитель должен обеспечить запись непрерывного интенсивного потока цифровых изображений размером 33,5 МБ (размер кадра ФПУ4040) и 75,5 МБ (размер кадра ФПУ6060) на диск со скоростями 805 МБ/с и 3322 МБ/с соответственно. Как видно из таблицы 4.4, узким местом становится запись на диск видеоданных от ФПУ6060. Только один накопитель с трудом удовлетворяет такой быстрой скорости записи данных большого объёма, а именно, модель *SSD Gigabyte AORUS NVMe Gen4*.

3.5. Архитектура контроллера

При выборе архитектуры и конструкции контроллера для ФПУ были сформулированы и приняты во внимание следующие основные требования:

- построение видеоканала, позволяющего обрабатывать сигнал на различных скоростях считывания, с реализацией максимально возможной скорости считывания для выбранного типа детектора;
- обеспечение малого шума считывания;
- компактная конструкция контроллера;
- фотоприёмное устройство может быть значительно удалено от управляющего компьютера;
- использование стандартного внешнего интерфейса контроллера ФПУ для сопряжения с управляющим компьютером;
- должна быть обеспечена передача и сохранение большого потока цифровых данных от ФПУ;
- полная программируемость и телеметрический контроль режимов ФПУ;
- малая мощность, выделяемая контроллером и фотоприёмной камерой;
- широкий рабочий температурный диапазон ФПУ.

Основополагающим требованием из перечисленных является достижение низких шумов считывания. Для реализации этого требования в контроллере необходимо осуществить целый комплекс мер, а именно:

- единственный генератор задающей частоты в камерной электронике;
- эффективная противозумовая фильтрация в канале обработки сигнала;
- развязка и древовидная топология аналоговых и цифровых схемных земель;
- экранирование, тщательная разводка и согласование сигнальных линий, снижающих помехи.

Прежде всего, существует необходимость иметь в контроллере единственный генератор задающей частоты, с тем, чтобы отсутствовали другие частоты, которые могли бы интерферировать с основной. Также, в ФПУ не желательно в принципе иметь процессорные устройства, которые генерируют широкий спектр частот.

Разработанная структура контроллера фотоприёмного устройства приведена на рисунке 3.5.1.

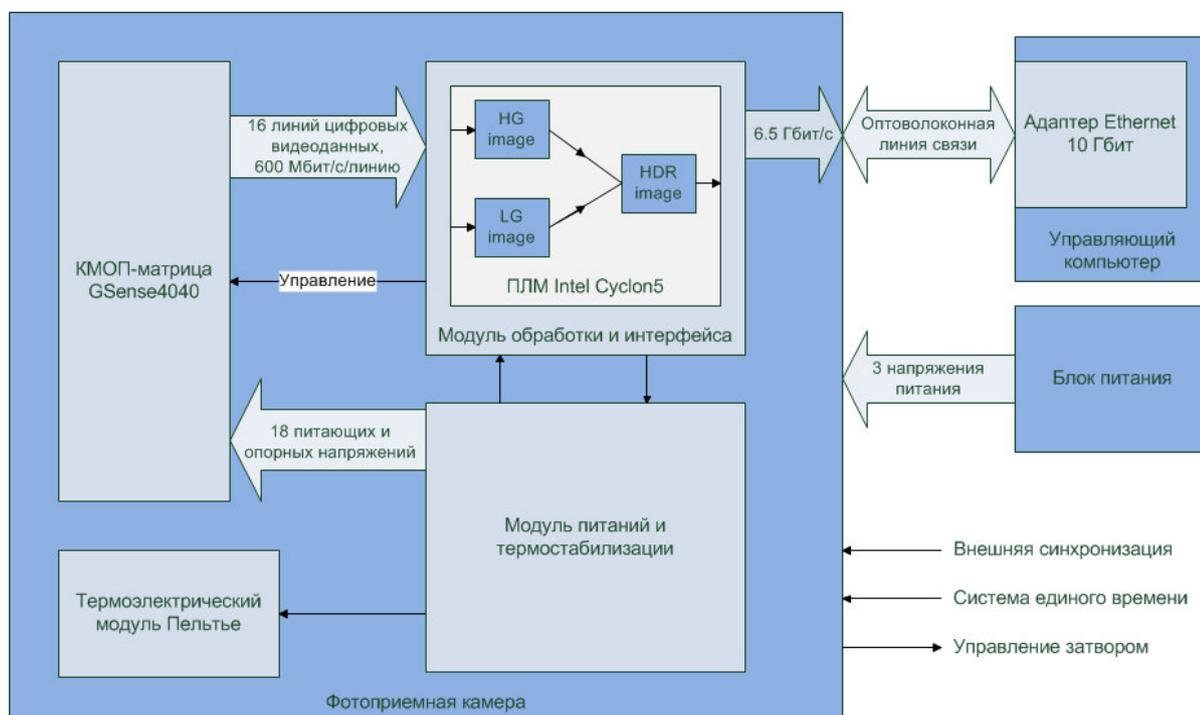


Рисунок 3.5.1 – Структура контроллера фотоприёмной системы

Контроллер включает узел фотоприёмника, узел формирования питающих напряжений и узел управления фотоприёмником, обработки и передачи видеоданных. Кадр считывается одновременно через 2 видеовыхода с различным усилением, преобразуется в 12-битный цифровой код прямо в фотоприёмнике и передается в контроллер по 16-ти цифровым линиям данных. Контроллер из полученных двух кадров должен сконструировать результирующий кадр с разрешением 16 бит. При частоте кадров 24 кадр/с формируется интенсивный поток цифровых видеоданных – до 6,5 Гбит/с.

Контроллер строится на базе программируемой логической матрицы высокой степени интеграции со встроенными приёмо-передатчиками *Ethernet* производительностью 10 Гбит/с. Контроллер реализует высокие фотометрические характеристики фотоприёмника – низкий шум и большой динамический диапазон при одновременном считывании изображения по двум видеоканалам с различным усилением и последующим объединением в один кадр. Имеются также режимы считывания с двукратным бинингом, режимы со строковым затвором и с общим сбросом; считывание нескольких фрагментов кадра, накопление в режиме пониженного темнового тока для длинных экспозиций. Длительность экспозиции – от 10 мкс (для фрагментов) до 1000 с. Предусмотрена возможность привязки кадров к системе единого времени. Синхронизация считывания кадров может осуществляться по внешнему или внутреннему сигналу.

Для передачи потока видеоданных к контроллеру используется оптоволоконная линия связи длиной до 30 м с обменом пакетами в стандарте *Ethernet IEEE 802.3* с адаптером 10 Гбит/с со стороны управляющего компьютера

На основе данной структуры выполнена разработка электрических схем и проектов печатных плат для контроллера ФПУ, включая плату фотодетектора, плату питания и термостабилизации, плату распределительную и плату обработки и интерфейса. Разработаны структура и схемы *IP*-ядер, содержащиеся в ПЛМ, осуществляющие управление видеосистемой и выполняющие обработку и передачу видеоданных.

3.6. Программное обеспечение управляющего компьютера

Программное обеспечение фотоприёмной системы на базе КМОП-фотоприёмника (ПО-КМОП) должно разрабатываться в соответствии с требованиями ЕСПД.

Разработка программного обеспечения должна производиться одновременно с разработкой технических средств. ПО-КМОП должно поставляться в виде готовых программных изделий на стандартных носителях информации.

3.6.1. Назначение и область применения

Наименование программы – «Комплекс программ сбора данных и управления фотоприёмным устройством на базе КМОП».

Назначение программного обеспечения – получение, визуализация и сохранение данных, поступающих от КМОП-ФПУ, а также управление; настройка, телеметрия и диагностика КМОП-ФПУ.

3.6.2. Постановка задачи на разработку программы

Программное обеспечение должно иметь исполнения для работы на управляющих компьютерах на платформе *AMD X570* и функционировать под управлением операционной системы *Windows 10*.

Комплекс программ должен исполнять следующие основные функции:

- управление режимами работы КМОП-фотоприёмника в интерактивном режиме и из командной строки;
- задание параметров экспозиции (накопление, считывание);
- приём и сохранение видеоданных;
- визуализация и предварительная обработка кадров;
- настройка, телеметрия и тестирование КМОП-ФПУ;
- контроль температуры;
- измерение фотоэлектрических характеристик КМОП-ФПУ;
- передача кадров на долговременное хранение во внешнее хранилище (архивирование);
- автоматический режим наблюдений.

Основные характеристики КМОП-ФПУ, используемые и учитываемые при разработке программного обеспечения, приводятся в табл. 3.6.1.

Таблица 3.6.1 – Характеристики КМОП-ФПУ

	ФПУ4040	ФПУ6060
Размер кадра, пиксели	4096 × 4096	6144 × 6144
Объём информации в 1 кадре, байты	33 554 432	75 497 472
Частота кадров, кадр/с	24	44
Время считывания кадра, с	0,0417	0,0227
Скорость поступления данных, МБайт/с	805	3 322
Количество информации, поступающей за 1 час непрерывной работы, ТБ	2,9	11,96

Комплекс программ сбора данных и управления КМОП-ФПУ можно отнести к классу параллельных систем с элементами приложений реального времени и распределенных систем. Для проектирования таких программ нужны объектно-ориентированные методы разработки, чтобы спроектировать параллельную, основанную на обмене сообщениями программу, с возможностью размещения основных подсистем на одном компьютере, либо на отдельных физических узлах сети.

Для достижения подобной гибкости программный продукт необходимо разрабатывать так, чтобы решение о соответствии между физическими узлами сети и программными компонентами принималось не на этапе проектирования, а позже, на этапе эксплуатации, в момент конфигурирования системы. В связи с этим, при выборе способа передачи данных между задачами из разных подсистем, необходимо ограничиться механизмом передачи сообщений.

Подсистема обеспечивает сокрытие информации на более высоком уровне, чем отдельный объект, и представляет собой замкнутую, автономную часть целой системы, решающую какую-либо одну или несколько специальных задач.

Классы решаемых задач:

- взаимодействие с внешней средой (КМОП-ФПУ);
- передача данных между параллельно работающими приложениями/потоками;
- асинхронная передача сообщений между параллельными задачами и активными объектами;
- синхронизация задач;
- разделение аппаратных ресурсов;
- проблема взаимного исключения.

Исходя из сформулированных требований и критериев, комплекс программ сбора можно разбить на следующие компоненты:

- графический интерфейс с пользователем, предоставляющий интерактивное управление КМОП-ФПУ, а также настройку, телеметрию, диагностику и тестирование (подсистема-клиент-1);
- управление КМОП-ФПУ из командной строки (подсистема-клиент-2);
- обмен данными с интерфейсной платой связи, к которой подключено КМОП-ФПУ (подсистема-сервер);
- набор программных компонентов для разработчика (*SDK*) (библиотека классов и функций);
- драйвер интерфейсной платы и библиотека функций взаимодействия с драйвером;
- визуализация и анализ изображений.

Нужно принять во внимание, что в данном проекте принята концепция использования стандартизованного покупного интерфейсного устройства (сетевое интерфейсное адаптера) для соединения компьютера с КМОП-ФПУ. Для интерфейсного адаптера связи необходима библиотека функций взаимодействия с драйвером.

Компоненты для разработчика должны обеспечивать программный интерфейс (*API*) для полноценного использования КМОП-ФПУ из внешних программ. Компоненты сбора данных и управления КМОП-ФПУ в интерактивном режиме и из командной строки для своей работы должны использовать *SDK*.

3.6.3. Выбор и обоснование состава программных средств

Выбор операционной системы (ОС) – *Microsoft Windows 10* – продиктован компьютерной архитектурой системы ввода-вывода цифровых изображений. Выбор разрядности ОС – *x64* – обусловлен необходимостью использования больших объёмов операционной памяти для быстрого сбора и визуализации кадров КМОП-ФПУ.

Для выполнения поставленной задачи требуются удобные инструменты разработки пользовательского интерфейса, обеспечивающие выполнение процессов, потоков, средств сетевого взаимодействия систем, подсистем, и исполнительных устройств.

Комплексным решением разработки приложений и графических интерфейсов является кроссплатформенный свободный инструментарий разработчика *Qt*.

Qt позволяет запускать написанное с его помощью программное обеспечение в большинстве

современных операционных систем путём простой компиляции программы для каждой операционной системы без изменения исходного кода. Инструментарий включает в себя все основные классы, которые могут потребоваться при разработке прикладного программного обеспечения, начиная от элементов графического интерфейса и заканчивая классами для работы с сетью, базами данных и XML. Qt является полностью объектно-ориентированным, легко расширяемым и поддерживающим технику компонентного программирования.

Для реализации алгоритмов высокого уровня требуется язык программирования C++. Преимущества языка C++:

- предоставляет возможность легко и просто оперировать всеми основными машинными аспектами достаточно очевидным для программиста образом;
- объектно-ориентированные свойства позволяют прямо и коротко выражать концепции решения оставленной задачи;
- за исключением второстепенных деталей, является надмножеством языка программирования C, включает в себя все его достоинства, такие, как: лаконичность записи алгоритмов, логическая стройность написанных программ, их переносимость между компьютерами с различной архитектурой и различными операционными средами;
- программы, написанные на этом языке программирования, сравнимы по скорости с программами, написанными на языке ассемблера, при этом они более наглядны и просты в сопровождении;
- предоставляет гибкие и эффективные средства определения новых типов, что позволяет создавать проще понимаемые и легче контролируемые программы.

3.7. Расчёт и выбор охлаждающего устройства

Для достижения предельных характеристик чувствительности и динамического диапазона сигнала необходимо обеспечить охлаждение фотоприёмника. Зависимость темнового тока фотоприёмника GSense4040 (усреднение по всем пикселям) от температуры приведена на рисунке 3.7.1.

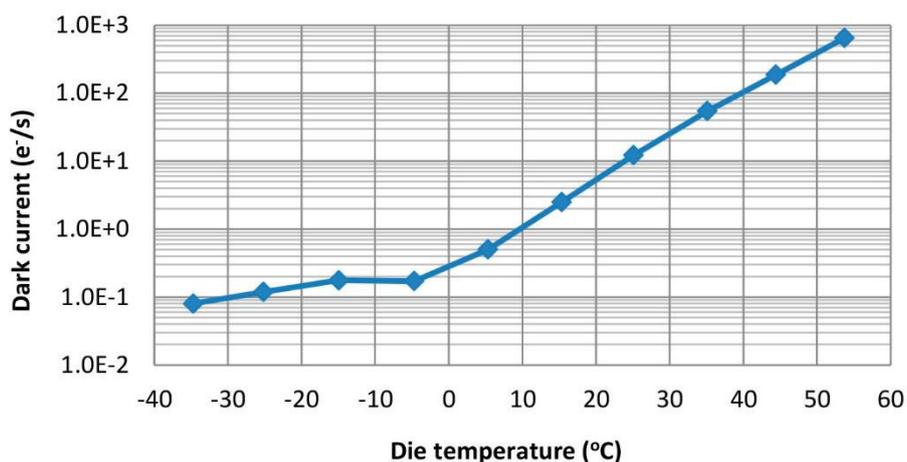


Рисунок 3.7.1 – Зависимость темнового тока от температуры подложки фотоприёмника GSense4040

Таким образом, уже при температуре $-5...-10^{\circ}\text{C}$ темновой ток фотоприёмника уменьшается до достаточно низкого значения $<0,2 \text{ e}^-/\text{пиксель}/\text{сек}$.

Фотоприёмная камера должна эксплуатироваться при температурах окружающей среды от -30 до $+40^{\circ}\text{C}$. Следовательно максимальная разность температур, которую должна обеспечить система охлаждения ФПУ, при рабочей температуре фотоприёмника от -10 до -25°C , составляет 65°C .

Принимая во внимание рабочую температуру фотоприёмника и требования к габаритам ФПУ,

обоснованным выбором будет использование термоэлектрической системы охлаждения на основе двухкаскадного модуля Пельтье.

Термоэлектрические модули на основе эффекта Пельтье широко используются в астрономии для охлаждения ПЗС-детекторов до температур -90°C . Модули Пельтье имеют ряд существенных достоинств по сравнению с другими системами охлаждения детекторов. Имея незначительный вес, габариты и энергию потребления, они обеспечивают высокую эксплуатационную надежность.

Определим тип термоэлектрического модуля, способного обеспечить максимальный перепад 65°C от температуры окружающей среды.

Теплопритоки, поглощаемые холодной стороной ТЭМ:

$$Q_{\text{ТЭМ}} = Q_{\text{фп}} + Q_{\text{ст}},$$

где,

$Q_{\text{фп}}$ – мощность, выделяемая фотоприёмником при его функционировании,

$Q_{\text{ст}}$ – мощность излучения стенок оптической головки, передаваемая к холодным элементам системы охлаждения фотоприёмника.

Согласно техническим характеристикам, *GSense4040* во время работы выделяет мощность 1,4Вт.

Для определения теплопритоков от стенок оптической головки исключим из рассмотрения теплопередачу через собственно алюминиевые стенки головки, так как металл имеет гораздо более низкое тепловое сопротивление по сравнению с ксеноном, заполняющим свободный внутренний объём головки.

Мощность, выделяемая от стенок:

$$Q_{\text{ст}} = \frac{S_{\text{ст}} \cdot \Delta T}{\frac{t_{\text{хе}}}{\lambda_{\text{хе}}}}$$

где,

$t_{\text{хе}}$ – примерная толщина слоя ксенона между охлаждёнными элементами и внутренней поверхностью оптической головки. Исходя из конструкции, принимаем равной 0,002м,

$$\lambda_{\text{хе}} = 5.61 \times 10^{-3} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}},$$

$S_{\text{ст}}$ – внутренняя площадь поверхности оптической головки,

ΔT – максимальный перепад температур окружающей среды и холодных частей головки.

Площадь внутренней поверхности оптической головки определим приблизительно, считая её цилиндром с основанием $\varnothing 0,1\text{м}$ и высотой 0,05м. Тогда,

$$S_{\text{ст}} = 2 \cdot \pi \cdot 0.05^2 + 2 \cdot \pi \cdot 0.05 \cdot 0.05 = 0.0314\text{м}^2$$

Отсюда,

$$Q_{\text{ст}} = \frac{0,0314 \cdot 65}{\frac{0,002}{5.61 \cdot 10^{-3}}} = 5.7\text{Вт},$$

Общий теплоприток к холодной стороне ТЭМ,

$$Q_{\text{ТЭМ}} = 5.7 + 1.4 = 7.1\text{Вт},$$

Термоэлектрический модуль выбираем из номенклатуры изделий компании «Криотерм» – крупнейшем в России и одним из ведущих мировых лидеров в производстве высококачественных ТЭМ и систем на их основе.

Подходящим по габаритам и мощности является двухкаскадный модуль ТВ-2-(127-127)-1,3.

На рисунке 3.7.2 представлена зависимость холодильной мощности от перепада температур между горячей и холодной сторонами ТЭМ.

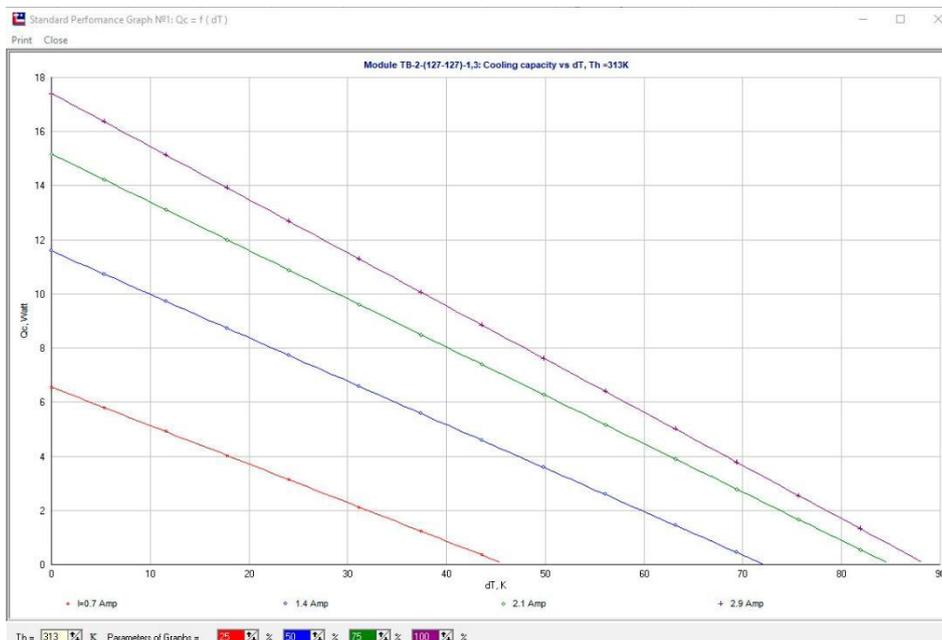


Рисунок 3.7.2 – Зависимость холодильной мощности от перепада температур ТЭМ

Наиболее напряжённым режимом работы системы охлаждения является функционирование без охлаждающей жидкости при температуре окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$. Принимая температурные потери тепловых интерфейсов холодной и горячей сторон системы охлаждения на уровне 15°C , а также учитывая тепловую нагрузку системы в 7Вт , определяем по графику, что мощность теплоотвода модуля при $\Delta T=65^{\circ}\text{C}$ составляет $4,5\text{Вт}$. Таким образом, для данных условий работы системы охлаждения потребуется работа двух параллельно соединённых модулей.

3.8. Конструкция ФПУ

Разработана конструкция фотоприёмной камеры. Внешний вид прототипа камеры представлен на рисунке 3.8.1.



Рисунок 3.8.1 – Внешний вид фотоприёмной камеры

Камера включает оптическую головку и корпус с электроникой. Конструкция образца фотоприёмной камеры представлена на рисунке 3.8.2.

Оптическая головка представляет собой герметичную камеру, изготовленную из алюминиевого

сплава. На верхнем фланце головки приклеено оптическое окно из оптического стекла марки К8. На верхнем фланце так же имеются отверстия для адаптера объектива. На торцевых стенках головки имеются отверстия для крепления камеры на оптическую систему.

Внутри головки размещен узел подвески детектора. Конструкция узла позволяет механически с высокой точностью устанавливать плоскость детектора относительно плоскости переднего фланца оптической головки, непосредственно перед герметизацией внутреннего объема.

Система охлаждения детектора представляет собой крышку оптической головки с приклеенным к ней термоэлектрическим модулем горячей стороной. Фотоприёмник монтируется на теплопроводе, который контактно во время герметизации головки соединяется с холодной стороной модуля через теплопроводную прокладку. Противоположная (внешняя) сторона крышки оптической головки соединена с радиатором-теплообменником, и через него с радиатором воздушного охлаждения. Радиатор-теплообменник снабжён штуцерами для подачи и приёма охлаждающей жидкости. Без использования охлаждающей жидкости он функционирует как теплопередатчик к радиатору воздушного охлаждения.

Система принудительного воздушного охлаждения обеспечивает функционирование системы охлаждения детектора и теплообмен с радиаторами электронных узлов контроллера камеры. Она представлена вентилятором, размещённым на задней торцевой панели фотоприёмной камеры, свободным внутренним объёмом контроллера камеры и окнами принудительной вентиляции.

Поток воздуха поступает через входные вентиляционные отверстия, расположенные на двух противоположных боковых стенках контроллера, и продувается через тонкие рёбра радиатора воздушного охлаждения системы охлаждения детектора. Далее поток воздуха движется вдоль внутреннего объёма контроллера камеры по направлению к задней панели, осуществляя теплообмен с электронными узлами контроллера камеры. В завершение, нагретый воздух высвобождается в окружающую среду через вентиляционные окна задней панели.

Конструкцию контроллера камеры составляют два герметичных модуля с размещённой внутри электроникой. Доступ к электронике происходит через демонтаж внешних крышек модулей (рис. 8.2 слева и справа). Коммуникационные разъемы камеры расположены на задней стенке. Конструкция модулей электроники способна обеспечить степень защиты *IP66* (пыленепроницаемость, защищенность от сильных водяных струй).

Разработан комплект чертежей деталей и сборочных чертежей камеры.

Реализация данного образца фотоприёмной камеры позволит получить следующие технические характеристики:

- рабочая температура фотоприёмника -10°C при воздушном охлаждении, -25°C при жидкостном охлаждении фотоприёмной системы;
- рабочая температура окружающей среды от -30°C до $+40^{\circ}\text{C}$;
- габариты камеры $\text{Ø}135 \times 240$ мм;
- масса камеры – менее 3 кг.

Заключение

Фотоприёмная система имеет следующие особенности:

- широкий диапазон рабочих температур;
- герметичное исполнение корпуса камеры;
- возможность воздушного или жидкостного охлаждения камеры;
- интерфейс связи с камерой имеет большую длину и обеспечивает достижение максимальной кадровой частоты приёмника;

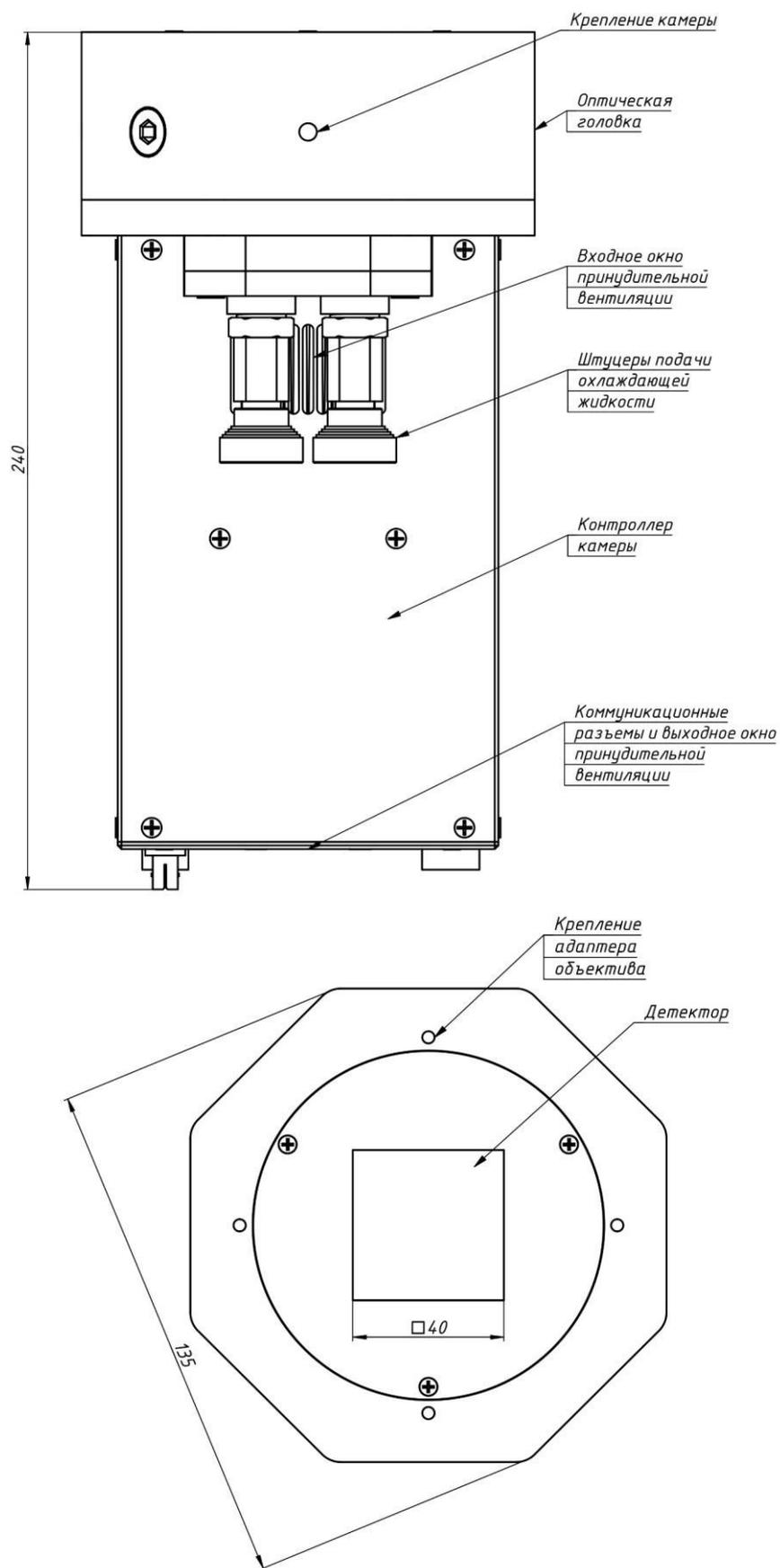


Рисунок 3.8.2 – Конструкция фотоприёмной камеры на основе КМОП-фотоприёмника GSense4040

- взаимодействие с системой единого времени для точной временной привязки каждого кадра;
- возможность работы в составе роботизированных телескопов;
- настройка возможностей камеры и программного обеспечения под нужды заказчика.

Результаты проекта позволят реализовать, по сути, новый класс фотоприёмных устройств – широкоформатные малошумящие фотоприёмные системы на основе быстродействующих фотоприёмников КМОП. На 6-м телескопе БТА фотоприёмные системы предполагается использовать в следующих приложениях: интегральная полевая спектроскопия и интерферометрия с интерферометром Фабри-Перо, спекл-интерферометрия и компенсация искажений волнового фронта.

Разработанные на первом этапе проекта технические решения планируется использовать на этапе 2020 года для варианта фотоприёмных систем с широкоформатными КМОП-матрицами *GSense6060*.

4. ЗАКУПКА ОБОРУДОВАНИЯ, МАТЕРИАЛОВ И КОМПЛЕКТУЮЩИХ

В ходе выполнения проекта проведены закупки и заключены контракты на поставку оборудования, материалов и комплектующих, необходимых для выполнения поставленных задач – модернизации УНУ БТА и проведения наблюдений.

По проекту модернизации спектрографа высокого разрешения НЭС (пункт 3.6 Соглашения о предоставлении субсидии) проведена закупка источника эмиссионного спектра, источника непрерывного спектра УФ-диапазона, устройства непрерывной заливки жидким азотом, испытательной климатической камеры, интерферометрического стенда для контроля оптических компонентов. Заключены контракты на поставку управляющего комплекса эшелле-спектрографом НЭС («Аврора»), адаптивной системы коррекции крупномасштабных аберраций волнового фронта (Институт адаптивной оптики), которая будет использоваться в качестве системы компенсации атмосферных искажений для спектрографа НЭС (п. 4.1.1 Соглашения о предоставлении субсидии).

По проекту создания автоматизированного комплекса аппаратуры для наблюдений быстропеременных астрофизических объектов с высоким временным разрешением (пункт 3.7 Соглашения о предоставлении субсидии) заключены контракты на поставку большой поворотной платформы («ВИКОН»), преобразователя «время-код» (Квантохрон 5-48) (ИП Солин), представляющего из себя устройство для регистрации моментов детектирования фотонов в координатно-чувствительных детекторах многомодового инструментального комплекса высокого временного разрешения (п. 4.2 Соглашения о предоставлении субсидии).

По проекту создания быстродействующих фотоприемных устройств на основе широкоформатных малощумящих КМОП-фотоприемников (пункт 3.8 Соглашения о предоставлении субсидии) заключен контракт на поставку сенсора GSENSE4040 CMT Grade1 (НПК «Фотоника»), радиоэлектронных компонент, материалов и комплектующих, изделий Ну-Лос, изделий ВОЛС, печатных плат, оптических окон.

Заключены контракты на поставку материалов и комплектующих, необходимых для проведения наблюдений на УНУ БТА, в том числе в интересах внешних заказчиков.

5. ПРОВЕДЕНИЕ ПЛАНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА УНУ БТА, В ТОМ ЧИСЛЕ В ИНТЕРЕСАХ СТОРОННИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

Выполнены плановые наблюдения на УНУ БТА в соответствии с расписанием, утвержденным директором САО по результатам распределения времени Национальным комитетом по тематике Российских телескопов (НКТРТ) на второе полугодие 2019 года. Протоколы решений НКТРТ, расписание наблюдений БТА и отчеты секретаря НКТРТ о наблюдениях в 2019 г., подтверждающие выполнение целевого показателя по числу организаций-пользователей УНУ БТА, приведены в Приложении 9 к настоящему отчету. Исследования осуществлялись как в интересах сотрудников базовой организации, так и в интересах сторонних организаций, в том числе иностранных исследователей. Среди поддержанных научных программ, по которым в рамках выполнения проекта были выполнены наблюдения во второй половине 2019 г. и ожидается подготовка публикаций в 2020 г., можно отметить следующие исследовательские проекты.

Измерение масс черных дыр в активных ядрах галактик по поляризации высокоионизованных широких эмиссионных линий (Measuring black hole masses in AGNs using polarization of highly ionized broad emission lines)

Заявитель D.Savic (Астрономическая обсерватория Белграда), наблюдения выполнены 29-30.12.2019

Предлагается проведение спектрополяриметрических наблюдений далекого активного ядра галактики (АЯГ) первого типа на красном смещении 1.862 для получения высококачественного поляризационного спектра. В недавних работах Афанасьева, Поповича и Савича был представлен новый независимый метод измерения масс сверхмассивных черных дыр в АЯГ по поляризации широких эмиссионных линий. Мы намерены провести наблюдения S-образного профиля позиционного угла плоскости поляризации и впервые применить этот метод к высокоионизованным широким эмиссионным линиям. В дополнение, успешные поляриметрические наблюдения могут позволить наложить новые ограничения на геометрию и динамику области формирования широких линий. Предлагаемая наблюдательная программа является частью десятилетнего сотрудничества между Астрономической обсерваторией Белграда и САО РАН.

Обзор протяженных ионизованных облаков вокруг локальных активных ядер галактик (Survey of extended ionized clouds around local AGN)

Заявитель W.Keel (Университет Алабамы, США), наблюдения выполнены 04.11.2019, 19.11.2019, 19.12.2019

Предполагается использовать длиннотелесные спектры для отождествления протяженных облаков вокруг галактик с активными галактическими ядрами (AGN), фотоионизированных излучением AGN. Многие из них демонстрируют свидетельства кардинального ослабления AGN на временах порядка 50000 лет. Результаты могут улучшить наши знания о продолжительности эпизодов аккреции в AGN. Получение новых спектров необходимо, поскольку при малой металличности наиболее сильные эмиссионные линии таких облаков похожи на линии обычных областей H II, поэтому ключевыми для детектирования являются эмиссии He II.

Исследование звезд в ассоциации Cyg OB2 и эволюционно близких к ним объектов

Заявитель О. Марьева (Астрономический институт Чешской академии наук), наблюдения выполнены 15.11.2019

Цель программы – исследование ассоциации Cyg OB2. Программа состоит из двух независимых частей. 1 часть – поиск новых членов ассоциации с помощью длиннощелевой спектроскопии слабых объектов. 2 часть – спекл-мониторинг гипергиганта CygOB2 #12. По результатам предыдущих наблюдений CygOB2 #12 со спекл-интерферометром было показано, что #12 – кратная система, состоящая из трёх компонент. Поэтому цель второй части программы – построение орбит и определения масс компонент.

Наблюдаемые проявления аккреции газа в дисковых галактиках

Заявитель Е.Егорова (ГАИШ МГУ), наблюдения выполнены 20.11.2019, 23.12. 2019

Главной целью программы является исследование наблюдательных свидетельств аккреции холодного газа извне как источника для поддержания звездообразования в галактиках. Возможными проявлениями такой аккреции может быть пониженная металличность газа и «возмущенная» морфология. В нашу выборку вошли галактики, находящиеся в разреженном окружении, с асимметричными областями звездообразования на периферии дисков, для которых кинематика ионизованного газа (полученная ранее на БТА с ИФП) может указывать на аккрецию газа или взаимодействие со спутниками. Предполагается провести их спектральные наблюдения с длинной щелью с фокальным редуктором SCORPIO. Это позволит получить распределение хим. состава в дисках галактик и выявить области с аномально низкими металличностями.

Звездный ветер и сверхновые в галактиках: исследование гигантских сверхоболочек III с инициированным звездообразованием

Заявитель Т. Лозинская (ГАИШ МГУ), наблюдения выполнены 20-22.12.2019

Продолжение программы исследования структуры, кинематики и спектра свечения многооболочечных комплексов, сформированных ионизирующим излучением, звездным ветром и сверхновыми в областях звездообразования. Сегодня особый интерес вызывают гигантские сверхоболочки (ГСО) III с очагами инициированного звездообразования в стенках. Мы планируем детальные исследования ГСО размером до 1-3 кпк и связанных с ними комплексов множественных ионизованных оболочек в областях звездообразования. Во 2-м полугодии 2019 г. объектами интереса являются области звездообразования в 11 близких dIrr галактиках, предполагаются их наблюдения со SCORPIO в режимах спектрографа с длинной щелью и прямых глубоких снимков в эмиссионных линиях. По результатам наблюдений будут детально исследованы структура множественных оболочек, условия ионизации и возбуждения в них, уточнена металличность газа в галактиках, проведено сопоставление с данными наблюдений космических телескопов и данными наблюдений нейтрального водорода в линии 21 см.

Исследование временных, частотных и поляризационных особенностей вспышек на красных карликовых звездах

Заявитель А.Степанов (Главная астрономическая обсерватория РАН), наблюдения выполнены 04-05.12.2019

В настоящее время не существует единого представления о механизме звездных вспышек. Для того, чтобы понять их природу, необходимо, прежде всего, иметь данные о вспышечной плазме, о её физических параметрах. Богатый материал о звёздных вспышках могут дать многоволновые исследования тонкой временной структуры излучения вспышек. Наблюдения с высоким временным разрешением при помощи многоканального панорамного фотополариметра (MPPP) САО РАН позволят получить уникальную информацию о вариациях интенсивности и поляризации излучения

вспыхивающих звезд. В предлагаемой программе планируется проводить мониторинг нескольких красных карликовых звезд с максимальной частотой вспышек, к которым относятся, например, UV Cet, AD Leo, YZ CaMi. Средняя частота вспышек звезд типа UVCet составляет 4 события в час (Р.Е.Гершберг «Активность солнечного типа звёзд главной последовательности», Антиква, 2015). При этом их излучение будет одновременно регистрироваться в двух полосах U и R(V,B), а также измеряться мгновенная величина его линейной поляризации. Следует особо отметить, что мониторинг на 6-метровом телескопе САО РАН предполагается сопровождать радионаблюдениями (РТ-32 ИПА РАН в Зеленчуке и Бадарах) и привлекать данные рентгеновских наблюдений существующих космических обсерваторий. Совместный анализ полученных на разных частотах временных, колориметрических и поляризационных характеристик вспышек (запаздывание, индексы жесткости etc), позволит исследовать нетепловые (когерентные) и тепловые нестационарные процессы в атмосферах красных карликов. Полученные результаты дадут возможность определять фундаментальные параметры вспышечной плазмы: температуру и плотность плазмы, магнитное поле, величину электрического тока. Цель программы - проверка и развитие существующих моделей звездных вспышек.

Определение основных физических параметров сверхмассивных черных дыр в активных ядрах галактик на основе спектрополяриметрических наблюдений

Заявитель Т.М. Нацвлишвили (Главная астрономическая обсерватория РАН), наблюдения выполнены 23-24.11.2019, 28.12.2019

Предполагается на основе результатов спектрополяриметрических наблюдений представленной выборки активных ядер галактик (АЯГ) определить некоторые фундаментальные параметры сверхмассивных черных дыр (СМЧД), среди которых наиболее важным является спин (безразмерный угловой момент вращения). Роль поляриметрических наблюдений в последнее время сильно возросла, это связано с тем, что именно поляриметрические наблюдения позволяют получить ограничения на основные физические параметры АЯГ, такие как спин СМЧД, параметр радиационной эффективности аккреционного диска, а также величина магнитного поля в области радиуса последней устойчивой орбиты и на горизонте событий СМЧД. Полученные оценки позволяют выявить статистические закономерности, описывающие строение АЯГ и сделать решающий выбор между всё возрастающим количеством различных моделей энерговыделения в центральной машине АЯГ.

Прямые наблюдения трансформации мало-массивных рентгеновских двойных в миллисекундные радиопульсары и обратно

Заявитель Ю.Шибанов (Физико-технический институт им. Иоффе), наблюдения выполнены 02-03.12.2019, 31.12.2019

Наблюдательное время выделено для продолжения много-цветовых широкополосных фото-поляриметрических БТА наблюдений высокого временного разрешения ряда близких маломассивных рентгеновских двойных и миллисекундных пульсаров в составе тесных двойных звездных систем с помощью комплекса МАНИЯ. Целью является исследование недавно открытых и еще не до конца понятных быстро протекающих процессов трансформации этих систем друг в друга. Трансформации сопровождаются быстрыми появлениями или исчезновениями пульсирующего радиоизлучения и аккреционного диска, а также изменениями темпа и типа аккреции, образованием ударных волн и струйных течений и др., которые проявляются в вариациях интенсивности излучения объектов в широком диапазоне длин волн от радио до гамма вплоть до временных масштабов менее

секунды. Стандартные наблюдения в оптическом диапазоне с временным разрешением около секунды не позволяют разрешать временную структуру ярких (до звездной величины) всплесков и провалов яркости в процессе трансформации. Результаты, полученные нами в 2017 году, показывают, что уникальные возможности комплекса МАНИЯ в сочетании с БТА позволяют это делать на миллисекундном уровне, сопоставимым с периодами вращения миллисекундных пульсаров, и получать новые ограничения на спектр пространственных структур, образующихся при этих процессах, а также детектировать собственное излучение пульсаров в оптическом диапазоне. Мы также планируем использовать МАНИЯ для поиска оптических всплесков от источника повторяющихся быстрых радио всплесков FRB 121102.

Спектроскопия членов ассоциации Ser OB1A с параллаксами Gaia DR2

Заявитель В.Л. Ченцов (САО РАН), наблюдения выполнены 07.11.2019

Точные параллаксы, измеренные заатмосферной обсерваторией Gaia (релиз 25.04.18, DR2) для звезд Ser OB1A и глобальным радиоинтерферометром для мазеров молекулярного облака M17 SWex, открывают новую возможность уточнить строение этого звездно-газово-пылевого комплекса. Разрешение по лучу зрения приблизилось к разрешению в картинной плоскости. Так, удаленность очага звездообразования M17 в северной части ассоциации (1.8 кпк) уверенно превышает расстояния до звезд ее центральной и южной частей (в среднем 1.6 кпк). Теперь важно дополнить нашу коллекцию спектров высокого разрешения спектрами нескольких звезд с DR2-параллаксами, расположенных вблизи M17 SWex, основного, "системообразующего" элемента комплекса, в частности, в III-области IC 4701, примыкающей к облаку с северо-запада. Кроме того, желательно продолжить спектроскопический мониторинг входящей в Ser OB1A уникальной пары LBV, прерванный в 2010 г.

Спектроскопия звезд в наземном УФ-диапазоне

Заявитель В.Е. Панчук (САО РАН), наблюдения выполнены 08-09.11.2019, 08.12.2019, 10.12.2019

Предполагается выполнить обзор звезд различной светимости в интервале спектральных классов G-K-M. Результаты наблюдений будут использованы для новой калибровки эффекта Вилсона-Баппу.

Спектроскопия и спектрополяриметрия избранных звезд с магнитными полями

Заявитель Е.А. Семенко (САО РАН), наблюдения выполнены 14.11.2019

Предлагаемый проект исследований подразумевает изучение ряда вопросов, связанных с магнитными полями Ap/Vp-звезд и включает оценки их химического состава, геометрии магнитного поля и эволюционного статуса. Телескоп БТА – единственный в классе инструментов с апертурой более 4-м, удовлетворяющий требованиям нашей программы. Спектрографы НЭС и ОЗСП 6-м телескопа БТА ранее надежно зарекомендовали себя в наших работах. Объекты исследования – звезды верхней части главной последовательности, главным образом спектральных классов В и А, с магнитным полем и выдающимися характеристиками, будь то экстремальные значения аномалий химического состава, периодов вращения или магнитного поля. Цель проекта – подробное исследование механизмов взаимодействия магнитного поля с веществом звездных атмосфер в процессе их эволюции.

Лунные покрытия звезд

Заявитель А. Бескакотов (САО РАН), наблюдения выполнены 16.11.2019

Предлагаются наблюдения звезд методом лунных покрытий. Основные цели можно разделить на две группы, соответствующие приоритетам в заявке: изучение гигантов и сверхгигантов с высоким пространственным разрешением, поиск тесных компонентов у звезд поля. Первая группа целей предполагает измерение угловых диаметров гигантов и сверхгигантов, поиск асимметрий их поверхностей, изучение атмосфер и распределения околозвездного вещества, поиск близких компонентов у звезд-гигантов. Вторая группа целей предполагает поиск тесных компонентов у карликов Главной последовательности с целью определения их кратности и выделения объектов пригодных для построения орбит и определения масс компонентов.

Магнитные поля массивных звезд Главной последовательности

Заявитель И.И. Романюк (САО РАН), наблюдения выполнены 17.11.2019, 17.12.2019

Предлагается провести полный (предел 11 зв. величина V) спектральный и магнитный обзор массивных O, B и A-звезд, членов молодых рассеянных звездных скоплений, возрастом менее 30 млн лет ($\log t < 7.5$). Составлена программа наблюдений для 6м телескопа, предполагающая наблюдения около 300 звезд в 30 относительно близких (расстояния до 1 кпк) скоплениях возрастом ($\log t = 6.5-7.5$). В результате выполнения программы мы ожидаем получить сведения о магнитных полях, лучевых скоростях, скоростях вращения и химическом составе нескольких сотен OBA-звезд Главной последовательности. Полученные данные позволят прояснить детали процессов возникновения и эволюции звездных магнитных полей.

Изучение геометрии и кинематики центральных областей активных ядер галактик методами спектрополяриметрии

Заявитель В.Л. Афанасьев (САО РАН), наблюдения выполнены 21-22.11.2019, 25-27.12.2019

Изучение активных галактических ядер методами спектрополяриметрии позволяют разделить круговые и радиальные движения в области формирования широких линий (ОФШЛ) активных ядер галактик на масштабах менее 0.1 парсека. В отличие от иных прямых и косвенных методов при помощи спектрополяриметрии можно получить независимые от угла наклона к лучу зрения оценки масс сверхмассивных чёрных дыр в центрах галактик. В конечном итоге, это позволяет оценить истинный угол наклона диска ОФШЛ к лучу зрения.

Спектроскопия кандидатов в протопланетарные туманности

Заявитель В.Г. Ключкова (САО РАН), наблюдения выполнены 06-07.12.2019

Программа направлена на изучение поздних стадий эволюции звезд с большими избытками ИК-потока. Цель программы - поиск проявлений процессов синтеза химических элементов в недрах AGB-звезд с исходными массами в $3-9$ масс Солнца, а также поиск закономерностей между фундаментальными параметрами звезд, наличием проявлений звездного нуклеосинтеза и особенностями морфологии оболочек. Основные задачи - фиксация эволюционного статуса и изучение кинематического состояния атмосфер звезд, теряющих массу за счет мощного ветра, что создает расширяющуюся структурированную околозвездную газопылевую оболочку. Для выявления вероятных двойственности, пульсационной нестабильности, а также для изучения переменности

процесса истечения вещества выполняется спектральный мониторинг избранных объектов, нацеленный на изучение переменности спектра и картины лучевых скоростей.

Спекл-интерферометрия орбитальных магнитных звезд

Заявитель Д. Растегаев (САО РАН), наблюдения выполнены 09.12.2019

С 2009 по 2013 гг. на 6 метровом телескопе БТА нами были проведены спекл-интерферометрические наблюдения всех известных звезд (Ap/Bp) северного полушария, обладающих глобальными магнитными полями. Из 273 объектов на отдельные компоненты были разрешены 63 звезды (58 двойных и 5 тройных систем). Наши наблюдения с высоким угловым разрешением позволили увеличить число известных двойных и кратных магнитных звезд. Впервые были обнаружены компоненты у 30 звезд, что составляет 48% от общего числа разрешенных нами объектов или более 10% от всех известных звезд с глобальными магнитными полями в северном полушарии. В совокупности с данными из литературы о спектральных и визуальных исследованиях магнитных звезд нам удалось надежно определить соотношение одиночных, двойных и кратных систем в выборке этих уникальных объектов. Мы предлагаем в качестве дальнейшего логичного шага в исследовании звездного магнетизма продолжить спекл-интерферометрические наблюдения и построить орбиты некоторых разрешенных нами систем с целью определения фундаментальных параметров компонентов (масс, светимостей и т.п.). Напомним, что один из самых важных параметров в теории звездной эволюции – масса – надежно определяется только из элементов орбиты двойной звезды. На основе наших наблюдений мы отобрали 20 самых тесных пар (14 из которых разрешены нами впервые) с магнитными компонентами, что позволяет нам надеяться на быстрое орбитальное движение и определение фундаментальных параметров. Необходимость подобного рода исследований подчеркивается тем фактом, что на сегодняшний день ни у одной магнитной системы не определены надежно (с точностью лучше 3%) фундаментальные параметры компонентов.

Фотометрическое эхокартирование активных ядер галактик в диапазоне $0.1 < z < 0.8$

Заявитель Р. Уклеин (САО РАН), наблюдения выполнены 03.11.2019, 18.12.2019

Фотометрическое эхокартирование позволяет оценить характерные размеры области формирования широких линий (BLR) в активных ядрах галактик (AGN) на основе кросс-корреляции кривой блеска в континууме и запаздывающей кривой блеска в эмиссионной линии, формирующейся в облаках BLR – обычно используется Hbeta. Мы используем однородную выборку AGN, расположенных вблизи северного полюса неба, что делает их доступными для наблюдений в течение всего года. Основная цель программы - уточнить зависимость размера BLR-областей от светимости галактик на длине волны 5100 Å (Bentz+2009).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принимая во внимание приведенные выше материалы и результаты работы УНУ БТА в ходе проведения первого этапа проекта, приходим к выводу, что в целом задачи, поставленные Заказчиком перед Исполнителем, выполнены и соответствуют требованиям Технического задания.

В настоящем отчете приведен детальный проект модернизации УНУ БТА на 2019-2020 гг.: модернизация спектрографа высокого разрешения НЭС, создание автоматизированного комплекса аппаратуры для наблюдений быстропеременных астрофизических объектов с высоким временным разрешением, создание быстродействующих фотоприемных устройств на основе широкоформатных малошумящих КМОП-фотоприемников. В приложениях к отчету размещены отчет о патентных исследованиях, а также разработанные технические задания и конструкторская документация.

В полном объеме проведены наблюдения на УНУБТА в соответствии с расписанием (http://www.sao.ru/request/schedule/bta2019_2.html), обеспечено достижение целевых показателей проекта.

Проведены закупки и заключены контракты на поставку необходимого оборудования, комплектующих и материалов.

Достигнутый научно-технический уровень работ сопоставим с мировым уровнем.

Литература

1. Panchuk, Vladimir; Klochkova, Valentina; Najdenov, Ivan; Yushkin, Maksim. High resolution echelle spectrograph NES for visible and groundbased UV regions. *UV Astronomy: Stars from Birth to Death. Proceedings of the Joint Discussion n.4 during the IAU general Assembly of 2006.* Ana I. Gómez de Castro and Martin A. Barstow (eds.). ISBN 978-84-7491-852-6, p.179. July 2007. Bibcode: 2007uasb.conf..179P
2. Vogt, S.S. HIRES - a High Resolution Echelle Spectrometer for the Keck Ten-Meter Telescope. ESO Workshop on High Resolution Spectroscopy with the VLT. Proceedings, held in Garching, Germany, February 11-13, 1992. Editor, M.-H. Ulrich; Publisher, European Southern Observatory, Garching bei Munchen, Germany, 1992. LC # QB870 .E86 1992. ISBN # 3923524439. P. 223, 1992. June 1992. Bibcode: 1992ESOC...40..223V
3. Pepe, F.; Molaro, P.; Cristiani, S.; Rebolo, R.; Santos, N. C.; Dekker, H.; Mégevand, D.; Zerbi, F. M.; Cabral, A.; Di Marcantonio, P.; Abreu, M.; Affolter, M.; Aliverti, M.; Allende Prieto, C.; Amate, M.; Avila, G.; Baldini, V.; Bristow, P.; Broeg, C.; Cirami, R.; + ... ESPRESSO: The next European exoplanet hunter. *Astronomische Nachrichten*, Vol.335, Issue 1, p.8. January 2014. DOI: 12.1002/asna.201312004 Bibcode: 2014AN....335....8P
4. Dekker, Hans; D'Odorico, Sandro; Kaufer, Andreas; Delabre, Bernard; Kozłowski, Heinz Design, construction, and performance of UVES, the echelle spectrograph for the UT2 Kueyen Telescope at the ESO Paranal Observatory. *Proc. SPIE Vol. 4008*, p. 534-545, *Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*, Masanori Iye; Alan F. Moorwood; Eds. Pub Date: August 2000. DOI: 10.1117/12.395512 Bibcode: 2000SPIE.4008..534D
5. Panchuk, V. E.; Yushkin, M. V.; Yakopov, M. V. High-resolution fiber-fed spectrographs. *Astrophysical Bulletin*, Volume 66, Issue 3, pp.355-370. July 2011. DOI: 10.1134/S1990341311030084 Bibcode: 2011AstBu..66..355P
6. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Юшкин М.В., Найденов И.Д. 2009. Спектрограф высокого разрешения 6-метрового телескопа БТА. *Оптический журнал*. т.76, №2, с.42-55.
7. Schroeder, D. J.; Hilliard, R. L. Echelle efficiencies: theory and experiment. *Applied Optics*, Volume 19, Issue 16, August 15, 1980, pp.2833-2841. DOI: 10.1364/AO.19.002833 Bibcode: 1980ApOpt..19.2833S
8. Panchuk, V. E.; Chuntunov, G. A.; Naidenov, I. D. Main stellar spectrograph of the 6-meter telescope. Analysis, reconstruction, and operation. *Astrophysical Bulletin*, Volume 69, Issue 3, pp.339-355. July 2014. DOI: 10.1134/S1990341314030109 Bibcode: 2014AstBu..69..339P
9. Панчук В.Е., Ключкова В.Г., Юшкин М.В. *Астрон. Журн.* 2017. т.61, с.820-831.
10. Панчук В.Е., Юшкин М.В., Емельянов Э.В. Препринт САО №212, 2006.
11. [1] Fowler, B., Liu, C., Mims, S., et al, "High-Performance CMOS Image Sensors at BAE SYSTEMS Imaging Solutions", *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V*, edited by Andrew D. Holland, James W. Beletic, *Proc. of SPIE Vol. 8453*, 84530D · © 2012 SPIE · CCC code: 0277-786X/12/\$18 · doi: 10.1117/12.924518
12. [2] Jérôme Pratlong, Shiang-Yu Wang, Matthew Lehner, Paul Jorden, Paul Jerram, Steven Johnson, "A 9 megapixel large-area back-thinned CMOS sensor with high sensitivity and high frame-rate for the TAOS II program," *Proc. SPIE 9915*, *High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII*, 991514 (27 July 2016); doi: 10.1117/12.2233034