

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)»

На правах рукописи

Щербина Глеб Артурович

**МАКЕТ МНОГОЦЕЛЕВОЙ КОСМИЧЕСКОЙ
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ КАМЕРЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ПРИРОДНЫХ АКВАСИСТЕМ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Доктор физико-математических наук,
профессор Кондранин Тимофей Владимирович

Москва – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
Глава 1 Гиперспектральные оптико-электронные системы наблюдения прибрежных аквасистем	14
1.1. Прибрежные аквасистемы.....	14
1.1.1. Биофизические параметры аквасистем	14
1.1.2. Влияние характеристики сигнал/шум на точность определения биофизических параметров: хлорофилла-А, CDOM и TSS	17
1.2. Гиперспектральная аппаратура	22
1.2.1. Существующие и разрабатываемые образцы гиперспектральных камер космического базирования.....	22
1.2.2. Устройство « <i>push-broom</i> » гиперспектральных камер.....	25
1.3. Основной показатель качества работы ГСК, сквозное частотно-энергетическое уравнение.....	29
1.3.1. Сигнально-шумовые характеристики тракта ГСК космического базирования.....	32
1.3.2. Общая функция передачи модуляции тракта космической ГСК.....	34
1.3.3. Используемый в работе метод измерения функции передачи модуляции ГСК.....	39
1.3.4. Пороговая частотно-энергетическая характеристика (ПЧЭХ) анализатора изображения	43
Выводы по Главе 1	45
Глава 2 Метод комбинированного отслеживания изображения (КОИ) « <i>push-broom</i> » гиперспектральной камеры	47
2.1. Предпосылки создания ГСК с КОИ.....	47
2.1.1. Функциональная зависимость величины полезного сигнала от проекции пикселя на подстилающую поверхность	47
2.1.2. Поведение частотной и энергетической характеристик ГСК при уменьшении проекции пикселя на подстилающую поверхность	50
2.2. Принцип работы многоцелевой гиперспектральной камеры	52
2.3. Метод комбинированного отслеживания изображения.....	54
2.4. Структурная схема алгоритма комбинированного отслеживания изображения гиперспектральной камеры	56

Выводы по Главе 2	64
Глава 3 Специальный режим электронного отслеживания изображения на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы.....	66
3.1. ПЗС фотоприемные устройства.....	67
3.1.1. Процесс детектирования фотозаряда в пикселе ПЗС ФПУ	67
3.1.2. Архитектуры различных ПЗС ФПУ	68
3.2. Специальный режим электронного отслеживания (ЭО) изображения на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы.....	74
3.2.1. Алгоритм управления специального режима ЭО в строчно-кадровой ПЗС-матрице.....	74
3.2.2. Эффективный размер кадра в специальном режиме ЭО строчно-кадровой ПЗС-матрицы.....	77
3.3. Экспериментальное изучение энергетических и частотных характеристик реализованного специального режима ЭО строчно-кадровых ПЗС ФПУ	78
3.3.1. Нормированная чувствительность специального режима ЭО	79
3.3.2. Измерение величины максимальной зарядовой ёмкости и собственных шумов в кадровом режиме и в специальном режиме ЭО	80
3.3.3. Измерение функции передачи модуляции «смаза» и рассогласования режима ЭО	85
Выводы по Главе 3	91
Глава 4 Исследование влияния воздействия протонов на строчно-кадровую ПЗС-матрицу, работающую в режиме ЭО и в кадровом режиме	92
4.1. Характеристики и условия облучения исследуемого образца ФПУ	94
4.2. Изучение поведения радиационных дефектов в кадровом режиме.....	96
4.2.1 Дефекты вертикального регистра в кадровом режиме	97
4.2.2. Дефекты фотодиода в кадровом режиме.....	102
4.3. Изучение поведения радиационных дефектов в специальном режиме ЭО	106
4.3.1. Дефекты вертикального регистра в режиме ЭО	108
4.3.2. Дефекты фотодиода в режиме ЭО	109
4.3.3. Исправление влияния последствий обоих видов радиационных дефектов в режиме ЭО	110
Выводы по Главе 4	114

Глава 5 Макет многоцелевого гиперспектрометра с комбинированным отслеживанием изображения и подтверждение эффективности метода комбинированного отслеживания изображения при решении задачи составления карты концентрации ChlA на базе полученных космических снимков (ГСК МКА-ФКИ)	117
5.1. Макет ГСК с КОИ	117
5.2. Экспериментальное изучение частотной и энергетической характеристик ГСК с КОИ, итоговая частотная сигнально-шумовая характеристика	119
5.3. Модельный расчет оптической схемы ГСК с КОИ для проведения космического эксперимента.....	125
5.4. Подтверждение важности метода КОИ при решении задачи составления карты концентрации хлорофилла-А.....	129
5.4.1 Гиперспектральная аппаратура космического базирования (МКА-ФКИ ПН1)	130
5.4.2. Алгоритм вычисления концентрации ChlA.....	131
5.4.3. Результаты вычисления ChlA для базового и увеличенного значения характеристики отношения сигнала к шуму	134
Выводы по Главе 5	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....	142
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143

Введение

Среди земных экологических систем особое место отводится так называемым эстуариям (от латинского aestus — морской прилив и отлив), которые занимают обширные регионы между открытыми водными пространствами морей, океанов и континентами, включая устья рек, заливы и т.п. В связи с тем, что такие физические факторы, как соленость, температура, биоорганические и минеральные примеси в прибрежных зонах, отличаются существенно большим разнообразием по сравнению с открытыми водами, эстуарии являются одними из самых плодородных и перспективных для промышленной разработки морских биоресурсов. В последние годы из-за природных и антропогенных факторов эти сложные природные системы испытывают колоссальную экологическую нагрузку.

Учитывая масштабы географического разнообразия и пространственно-временную изменчивость эстуарий, а также близких к ним по биофизическому статусу крупных внутренних водоёмов (внутренние моря, озера и пр.), крайне важной становится задача разработки надежных методов оперативного мониторинга биофизического состояния таких систем. Это состояние обычно определяется путем оценки концентраций оптически активных веществ в воде, таких как общее количество взвешенных твердых веществ (TSS), цветное растворенное органическое вещество (CDOM) и хлорофилла-А (ChlA) [1].

За последние десятилетия технологии авиакосмического дистанционного зондирования, направленные на определение экологического состояния природных аквасистем показали высокую эффективность [2]. Однако, выяснилось, что из-за существенно большей пространственно-временной изменчивости и оптического разнообразия, извлечение полезной количественной информации в процессе мониторинга именно прибрежных вод оказывается существенно более сложным, чем при наблюдении за открытыми акваториями. Дело в том, что тактико-технические характеристики (спектральное [3] [4] и

пространственное [5] [6] разрешение) широко используемых в последнее время космических мультиспектральных датчиков наблюдения океана, таких как SeaWiFS, MODIS и MERIS [2] оказываются недостаточными для достоверного восстановления биофизических характеристик акваторий.

Одним из возможных путей качественного повышения информативности авиакосмических систем мониторинга водных пространств, включая эстуарии и близкие к ним аквасистемы, является использование бурно развивающихся в последнее десятилетие гиперспектральных (ГС) технологий [3] [7].

Следует отметить, что ГС технологии оказываются более эффективными по сравнению с мультиспектральными также при решении других прикладных задач: мониторинг сельскохозяйственных и лесных угодий, экологического состояния опасных производств, крупных транспортных магистралей, очистных сооружений, природных пожаров, определение состава и структуры минералогических образцов, поиск залежей углеводородных месторождений, военные приложения и т.д. [7]. Достаточно подробный обзор разработанных до 2012 года бортовых авиационных и космических гиперспектральных камер (ГСК) приведен в [8].

Если говорить о ГСК космического базирования, то, в первую очередь, следует отметить успешно проработавшие после запуска на орбите в течение нескольких лет зарубежные камеры: Hyperion (High Resolution Hyperspectral Imager) (космический аппарат (КА) EO-1, США, запуск 2000 г.); CHRIS (Compact High Resolution Imaging Spectrometer (КА PROBA-1, Европейское космическое агентство, 2001 г.); HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Oceans) (КА МКС, японский сегмент, 2009 г.); ARTEMIS (Advanced Responsive Tactically-Effective Military Imaging Spectrometer) (экспериментальный военный КА Tacat-3, США, 2009 г.). Среди зарубежных перспективных ГСК - Hyperspectral Imager (HSI) (КА PSLV (Polar Satellite Launch Vehicle, Германского аэрокосмического центра, программа EnMAP (Environmental Mapping Program; запуск КА отложен с 2013

на 2017 г.). Отечественные приборы: ГСК разработки ЗАО НПО «Лептон», КА МКА-ФКИ (ПН1) «Зонд-ПП, 2012 г.); ГСК разработки КМЗ, КА Ресурс-П №1, 2013 г.). Подавляющее большинство авиакосмических ГСК, в том числе и все указанные выше приборы, регистрируют информацию в виде солнечного излучения, отражённого от зондируемого объекта на подстилающей поверхности в нескольких десятках (до 200) узких спектральных каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов (от 350 до 2400 нм) в режиме («*push-broom*») (метлой по курсу). При этом наблюдаемая поверхность отображается в виде последовательного набора узких полос поперек направления движения носителя (КА): т.е. поперечная развертка осуществляется электронным считыванием сигналов с ориентированных поперек траектории полета КА строк матричного ПЗС-приемника, а продольная формируется за счет движения КА по траектории. При этом каждая полоса, отображаемая в виде узкого $\sim (5-20)$ нм (на порядок меньше по сравнению с мультиспектральными камерами) спектрального отклика соответствующего канала ГСК, выделяется, как правило, одной щелью, располагаемой в фокусах входного и коллимирующего объективов. В этом случае при условии сохранения требований обеспечения одновременно высокого пространственного и спектрального разрешения ГСК преимущества, связанные с возможностью получения «тонкой» спектральной информации по сравнению с мультиспектральными датчиками, могут быть обесценены за счет уменьшения соотношения сигнал/шум (***SNR***), связанного с существенно меньшим количеством фотонов, регистрируемых каждым детектором с значительно уменьшенной шириной спектрального канала.

Для объектов типа эстуарий, характеризующихся сильным поглощением оптически активных веществ, величина сигнала, поступающего на датчик составляет, как правило, не более (10-15) % от общего излучения, поступающего на датчик [9] [10]. Результатом являются большие ошибки в восстановлении количественных характеристик зондируемых объектов. Так, например, анализ

данных экспериментов с борта МКС с использованием гиперспектрометра NICO, специализированного для изучения состояния прибрежных акваторий, показал, что ошибки в определении концентрации хлорофилла-А достигала 80%, а концентрации взвешенных частиц и органических веществ - до 40% [11]. Таким образом, из-за низкого уровня сигнала при сохранении шумовых характеристик датчика, с одной стороны, и существенного влияния атмосферы, с другой, ГСК космического базирования, предназначенные для дистанционного зондирования подобных природных сред, должны иметь специфические конструктивные особенности, обеспечивающие необходимые уровни SNR. Один из возможных путей решения проблемы состоит в реализации многоцелевой схемы в сочетании с механическим отслеживанием изображения. В патенте [12] и статье [13] продемонстрирована возможность увеличения сигнально-шумовой характеристики ГСК за счет применения многоцелевой структуры и использовании крупногабаритного поворотного зеркала. Но добавление поворотного зеркала в конструкцию прибора нивелирует основное технологическое преимущество ГСК с «push-broom» в виде отсутствия подвижных частей. А также такое изменение негативно сказывается на массо-габаритных характеристиках, энергопотреблении и оптическом качестве прибора.

В связи с изложенным тема диссертации, посвященная разработке космического специализированного аппаратно-программного гиперспектрального комплекса, который обладает повышенным отношением сигнал/шум и в котором отсутствуют недостатки ранее предложенных подходов, является актуальной в научном и практическом плане.

Объект исследования: методы, технические решения, устройства и приборы получения и обработки гиперспектральных изображений, направленные на повышение достоверности восстановления количественных характеристик природных объектов на поверхности Земли.

Предмет исследования: ориентированный на космическое применение аппаратно-программный оптико-электронный гиперспектральный комплекс дистанционного зондирования.

Цель диссертационной работы: создание макета оптико-электронной «*push-broom*» ГСК космического базирования с электронным управлением формирования изображения, обеспечивающей существенное повышение отношения сигнал/шум при дистанционном зондировании природных аквасистем и других объектов с низкими значениями отражённого солнечного излучения.

Задачи работы

Для реализации цели должны быть решены следующие задачи:

1. Провести анализ информационных и тактико-технических характеристик космических ГСК и определить расширенную характеристику эффективности работы прибора.

2. Разработать новый подход к формированию изображения в ГСК с электронным комбинированным перемещением щелевой структуры и зарядовых пакетов (ЗП) по фотоприемному устройству (ФПУ), который должен обеспечить повышение расширенной сигнально-шумовой характеристики камеры.

3. Разработать математическую модель и реализовать ее в виде программного модуля управления перемещением ЗП по плоскости строчно-кадровой ПЗС-матрицы для использования в новом подходе функционирования ГСК.

4. Провести экспериментальное исследование влияния космического излучения на ФПУ, функционирующего в предложенном в работе новом режиме формирования изображения, и разработать программный модуль коррекции обусловленных радиацией шумов ФПУ.

5. Провести комплексирование основанного на новом подходе формирования и отслеживания изображения макета многощелевой гиперспектральной камеры и провести его лабораторную отработку.

6. Провести верификацию основных положений работы, обеспечивающих повышение сигнально-шумовой характеристики разработанного аппаратно-программного комплекса, с использованием реальных данных, полученных в ходе космического эксперимента с использованием одноцелевой гиперспектральной камеры разработки АО НПО «Лептон» МКА-ФКИ (2012-2013).

Методология и методы исследования

В работе были использованы методы физического, математического и численного моделирования, математической статистики, обработки информации, а также расчетно-теоретические и экспериментальные методы юстировки линзовых и зеркальных оптических систем.

Положения, выносимые на защиту

1. Универсальный показатель эффективности функционирования гиперспектральных камер космического базирования, учитывающий как сигнально-шумовые, так и частотно-пространственные характеристики прибора.

2. Основанный на электронном управляемом отслеживании изображения в фотоприемном и щелевом устройствах метод формирования гиперспектрального изображения (в работе назван метод комбинированного отслеживания изображения КОИ), обеспечивающий повышение отношения сигнал шум ГСК.

3. Основанный на неравномерном тактировании ЗП программный модуль управления специальным режимом электронного отслеживания (ЭО) в ФПУ.

4. Результаты экспериментов по изучению влияния космической радиации на ФПУ в режиме ЭО и программный блок коррекции радиационных дефектов.

5. Функционирующий в режиме КОИ исследовательский аппаратно-программный комплекс (макет многоцелевой ГСК).

6. Результаты верификации макета ГСК и подтверждение эффективности КОИ на примере обработки реальных космических снимков при решении задачи определения мест повышенной концентрации хлорофилла-А прибрежных аквасистем.

Научная новизна:

1. Предложен метод, обеспечивающий повышение отношения сигнал-шум функционирующей в режиме «*push-broom*» ГСК за счет применения новой концепции многоцелевой камеры с синхронным электронным управляемым отслеживании изображения в ЩУ и отслеживания спектрального отклика в ФПУ.

2. Разработана новая математическая модель, реализованная в виде программного модуля управления специальным режимом электронного отслеживания строчно-кадровой ПЗС-матрицы, обеспечивающая синхронизованное с микрозеркальной матрицей движение ЗП, вариативность выбора на каждом шаге времени накопления.

3. Впервые проведено экспериментальное исследование влияния потенциального космического излучения на формирование гиперспектрального изображения с электронным отслеживанием. На основании анализа результатов экспериментов реализован оригинальный программный блок обработки, корректирующий влияние радиационных дефектов на изображение. Вычислительные эксперименты позволили выявить новые эффекты по уточнению точек локализации и температурную зависимость радиационных дефектов.

4. Впервые скомплексирован макет многоцелевой гиперспектральной камеры видимого и ближнего ИК-диапазона с комбинированным отслеживанием изображения (патент на изобретение №2624622) и проведена его лабораторная отработка.

Достоверность результатов подтверждается:

- согласованностью полученных данных по критерию эффективности космических оптико-электронных камер дистанционного зондирования с опубликованными результатами других исследователей;
- удовлетворительным совпадением с теоретическими оценками результатов экспериментальных измерений пространственно-частотной

рассогласованности режима ЭО ФПУ и коэффициента увеличения чувствительности метода КОИ.

Практическая значимость и внедрение результатов работы

Разработанные в рамках диссертационной работы аппаратные модули и программные блоки управления и обработки были использованы:

- при разработке оптико-электронной аппаратуры высокого пространственного и спектрального разрешения космического назначения в АО «НПО «ЛЕПТОН»;
- в научно-учебной работе студентами кафедры «Систем, устройств и методов геокосмической физики» в Московском физико-техническом институте.

Научно-технические решения и практические результаты работы полностью отражены в патенте на изобретение «Многощелевая гиперспектральная камера с комбинированным отслеживанием изображения» № 2624622.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует п. 3 «Разработка, внедрение и испытания приборов, средств и систем контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, имеющих лучшие характеристики по сравнению с прототипами» паспорта научной специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий».

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы изложены в докладах на конференциях: 55-я научная конференция МФТИ, 2012; 57-я научная конференция МФТИ, 2014; XIII Всероссийская Открытая конференция “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”, ИКИ РАН, 2015; 58-я научная конференция МФТИ, 2015, 59-я научная конференция МФТИ, 2016.

Личное участие

Все научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе, были получены лично автором. На использованные в работе заимствованные теоретические положения и практические результаты имеются необходимые ссылки из публикаций.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 4 в журналах, включенных в перечень ВАК. Получен патент на изобретение «Многощелевая гиперспектральная камера с комбинированным отслеживанием изображения» № 2624622.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения, которое содержит копии актов внедрения практических результатов работы. Общий объем работы составил 153 страницы текста, 55 рисунков и 7 таблиц. Список литературы включает в себя 98 наименований.

Глава 1 Гиперспектральные оптико-электронные системы наблюдения прибрежных аквасистем

1.1. Прибрежные аквасистемы

Среди земных экосистем особое место занимают прибрежные акватории, которые окаймляют узкую береговую линию и играют важную роль в глобальной экосистеме Мирового океана. Такие районы являются связующим звеном между берегом и открытым океаническим водным пространством. Совместно с внутренними водоемами они составляют большой класс объектов прибрежных аквасистем и в зарубежной литературе носят название водных объектов 2-го рода (case II waters) [14], и в их состав входят: озера, реки, прибрежные воды морей и океанов. Из-за урбанизации побережья происходит загрязнение таких аквасистем, что негативно сказывается на экологической обстановке.

Для изучения состояния аквасистем составляется информационная база, в которую включаются данные систематических наблюдений за основными биофизическими параметрами. Достаточно полным является представление базы данных в виде карт концентраций биофизических параметров водных сред. А важными методологическими принципами при оценке состояния аквасистем являются наблюдения за динамикой, а также сравнение «чистых» водных зон с экологически неблагополучными районами.

1.1.1. Биофизические параметры аквасистем

Для прибрежных акваторий характерной является их близость к антропогенным источникам загрязнений, влияющая на биологический баланс экосистем. Биофизический статус таких вод определяется путем количественной оценки содержания оптически активных веществ в воде: концентрации хлорофилла-А, общего содержания взвешенных твердых частиц и содержания растворенного органического вещества.

Хлорофилл-А - это особая форма пигмента хлорофилла, которая требуется для процесса кислородного фотосинтеза. Поскольку хлорофилл-А присутствует во всех организмах, в которых происходит фотосинтез, то его количество является ключевым показателем численности таких организмов, типичным представителем которых является фитопланктон.

Целесообразность использования планктонного показателя обуславливается его способностью откликаться на уровень загрязнений не только токсическими соединениями, но и биогенными веществами [15].

Типичные концентрации хлорофилла-А в воде составляют от 2 до 50 мг/м³. Наиболее серьезные последствия уменьшения концентрации фитопланктона проявляются в виде уменьшения численности и популяций животного мира. В свою очередь, высокая концентрация хлорофилла-А является индикатором для промысловых судов, занимающихся выловом рыбы.

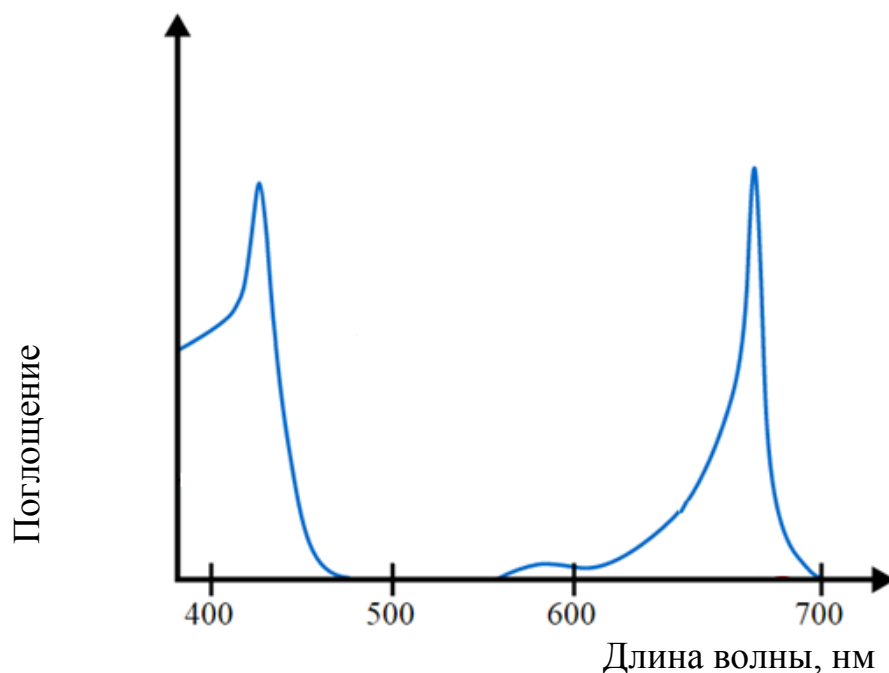


Рисунок 1.1. Спектральное поглощение хлорофилла-А

Наиболее успешный подход к дистанционному определению концентрации биофизических параметров состоит в проведении спектрального анализа вод, где в качестве исходных данных выступают известные линии поглощения вещества.

Для хлорофилла-А спектральные линии поглощения располагаются в фиолетово-голубой и оранжево-красной областях (Рисунок 1.1).

Следующим важным параметром состояния водных экосистем является концентрация взвешенных твердых частиц в водной толще или общая минерализация, в иностранной литературе этот термин носит название Total Suspended Solids (TSS). Общее содержание взвешенных частиц количественно определяется сухой массой частиц, захваченных фильтрами в очистных сооружениях. Этот показатель качества воды используется, например, для оценки качества сточных вод после прохождения системы фильтрации. В состав частиц в основном входят распространённые неорганические соли – хлориды, сульфаты кальция, магния, бикарбонаты и др. Значение этого параметра регламентируется нормативными документами Российской Федерации [16] [17] [18].

В зависимости от концентрации TSS воды делятся на следующие категории: слабоминерализованные (1-2 г/л), малой минерализации (2-5 г/л), среднеминерализованные (5-15 г/л), высокой минерализации (15-30 г/л), рассольные минеральные воды (35-150 г/л), крепкорассольные воды (150 г/л и выше).

Другим важным параметром для наблюдения является концентрация растворенного органического вещества или в зарубежной литературе Colored Dissolved Organic Matter (CDOM). CDOM присутствует во всех без исключения типах природной воды. Его типичные концентрации в воде составляют небольшое значение (около 20-50 мг/л), однако при этом, CDOM является основным резервуаром органического углерода на Земле. Запас CDOM в аквасистемах превышает запасы органического вещества суммарно находящихся во всех живых организмах. Из-за наличия гуминовых соединений CDOM хорошо поглощает ультрафиолетовый свет и люминесцирует, поэтому спектры воды с содержанием CDOM успешно регистрируются спектральными системами наблюдения. Типичный спектр флуоресценции CDOM состоит из двух широких

перекрывающихся полос в ультрафиолетовой области спектра: полоса с максимумом в области 300–350 нм (флуоресценция белковых или фенольных соединений) и в видимой области спектра с максимумом 400–450 нм (флуоресценция гуминовых соединений) [19]. По мере увеличения концентрации цвет воды будет изменяться с зеленого на желто-зеленый, и на коричневый. Спектральные особенности биофизических параметров CDOM и хлорофилл-А таковы, что они поглощают свет в близких спектральных диапазонах, и для проведения различия между этими двумя параметрами к данным предъявляются повышенные требования по спектральному разрешению и отношению сигнал/шум.

CDOM является как результатом природных процессов, так и результатом деятельности человека. Концентрация CDOM увеличивается в местах проведения заготовки леса, сброса сточных вод, осушения болот, а также при активном ведении сельского хозяйства. В целом, концентрации CDOM в пресных водах гораздо выше, чем в открытом океане, хотя параметр является зависимым от многих условий.

Повышение качества мониторинга состояния вод важно не только для оценки экологической обстановки, но также для коммерческих целей. Так как низкое качество вод в прибрежных аквасистемах, в конечном итоге оказывает негативное влияние на видовой состав и популяцию животного мира, качество морепродуктов, рекреационную деятельность и др.

1.1.2. Влияние характеристики сигнал/шум на точность определения биофизических параметров: хлорофилла-А, CDOM и TSS

В последние несколько десятилетий развитие авиационных и космических средств наблюдения за Земной поверхностью дало возможность решать задачу мониторинга открытой океанической водной поверхности. Однако из-за присущей сложности состава вод и высокой степени динамичности как по

времени, так и по пространству, мониторинг прибрежных вод до сих пор является сложной задачей.

Тем не менее, большой скачок в исследовании прибрежных аквасистем произошел в 2009 году за счет эксперимента с космической гиперспектральной камерой ***Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO)***. Аппаратура была установлена в Японском сегменте на борту МКС (Рисунок-1.2). Основным назначением проекта HICO было исследование биофизических параметров прибрежных акваторий. Аппаратура HICO являлась специализированной для решения задач количественного восстановления характеристик природных аквасистем, а ключевые технические характеристики (пространственное и спектральное разрешение, фокус и светосила объектива) сбалансированы для решения конкретной задачи.

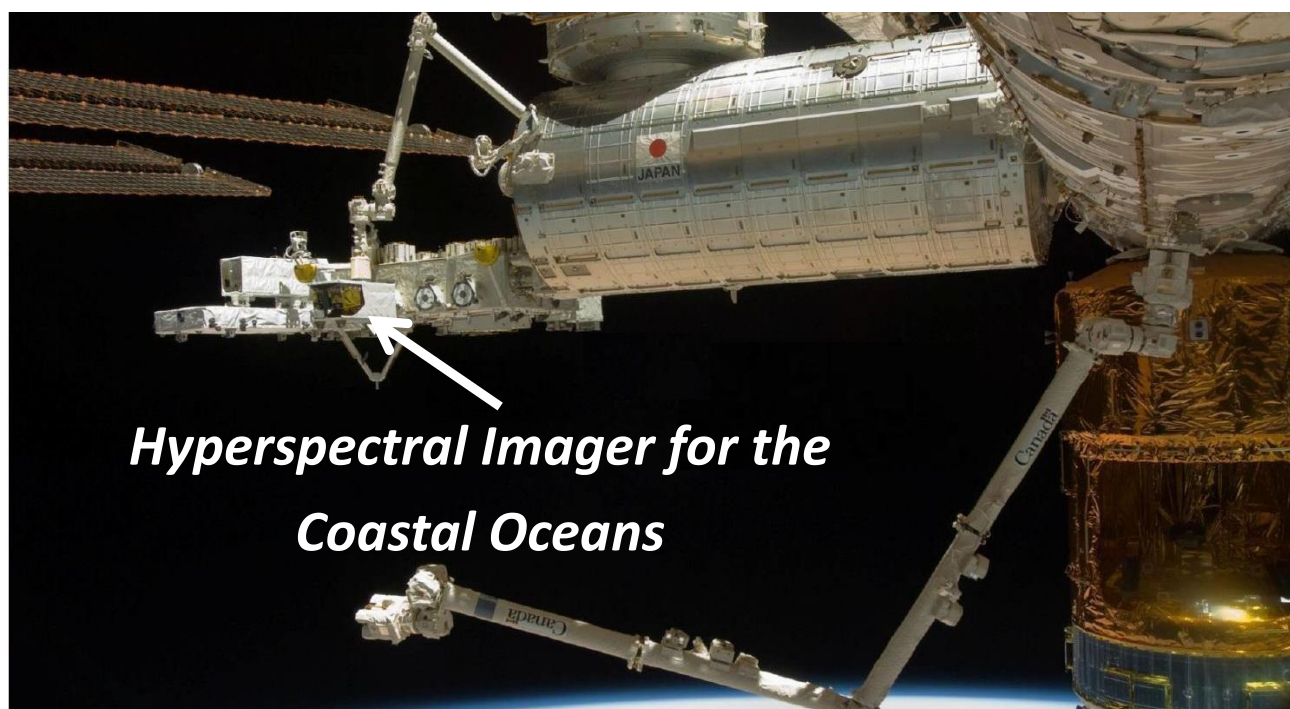


Рисунок 1.2. Космическая гиперспектральная камера на борту МКС
Hyperspectral Imager for the Coastal Ocean (HICO)

В свою очередь преимущество, достигнутое за счет высокого спектрального разрешения гиперспектральной системы, было нивелировано низкой величиной

отношения сигнал/шум [20] [21]. Особенно это касалось данных, полученных для определения биофизических параметров, чей радиометрический вклад пиков оказался 15% или меньше от общего излучения, зарегистрированного ГСК.

В работах [20] [21], показано, как точность определения концентрации хлорофилла-А, CDOM и TSS зависит от величины сигнально-шумовой характеристики. В качестве исходных данных для анализа выступала съемка озер штата Небраска, США, с параметрами съемки:

- дата: 9 февраля 2011,
- время: 15:30 (GMT),
- широта: 37°30',
- долгота: -76°10',
- высота КА: 400 км.

Первоначально с борта МКС были получены данные для определения концентрации и ошибки её нахождения для хлорофилла-А, ACDOM и TSS при значении $SNR_{peak}=252$. Далее решалась модельная задача их определения для большего значения SNR_{peak} . В Таблицах-1.1,1.2,1.3 приведены результаты обработки данных. Условия солнечной освещенности, определенные по дате и времени съемки, географическое положение, высота орбиты при решении модельной задачи соответствовали съемке с борта космической станции.

Единственное изменение произведено в части увеличения диаметра входного зрачка прибора с 0,019 м. на 0,024 м, что привело к изменению светосилы прибора с 3,5 на 2,8. И как результат произошло увеличение отношения сигнал/шум на 50 единиц.

Таблица 1.1. Относительная ошибка определения концентрации хлорофилла-А для двух значений отношения сигнал/шум [21]

Концентрация хлорофилла-А, мг/м ³	2	15	25	50
Ошибка определения концентрации хлорофилла-А, SNR _{peak} =252, [%]	50,8	16,9	13,6	10,0
Ошибка определения концентрации хлорофилла-А, SNR _{peak} =308, [%]	43,8	14,8	11,7	8,4
Коэффициент увеличения точности определения хлорофилла-А	1,16	1,14	1,16	1,19

Таблица 1.2. Относительная ошибка определения концентрации CDOM для двух значений отношения сигнал/шум [21]

Концентрация CDOM, м ⁻¹	0,1	2
Ошибка определения CDOM, SNR _{peak} =252, [%]	27,7	3,7
Ошибка определения CDOM SNR _{peak} =308, [%]	23,3	3,1
Коэффициент увеличения точности CDOM	1,19	1,21

Таблица 1.3. Относительная ошибка определения концентрации TSS для двух значений отношения сигнал/шум [21]

Концентрация TSS, г/м^3	1	4	8
Ошибка определения TSS, $\text{SNR}_{\text{peak}}=252$, [%]	24,7	5	1,7
Ошибка определения TSS, $\text{SNR}_{\text{peak}}=308$, [%]	21	4,2	1,6
Коэффициент увеличения точности TSS	1,18	1,18	1,1

При низких значениях концентраций хлорофилла-А = 2 мг/м^3 , CDOM = $0,1 \text{ м}^{-1}$ и TSS = 1 г/м^3 ошибка в их определения достигает 50,8%, 27,7% и 24,7% соответственно. При увеличении концентрации хлорофилла-А до 50 мг/м^3 ошибка снижается до 10%. При повышении концентрации CDOM до 2 м^{-1} и TSS до 8 г/м^3 , ошибка снижается до 3,7% и 1,7%, соответственно. Также показано, что увеличение SNR на 50 единиц приводит к уменьшению ошибки определения концентрации хлорофилла-А на 14-19%, CDOM на 20%, а TSS на 10-18 %.

Как будет рассмотрено в пункте 5.4.3 данной работы, характерная величина перепада концентрации хлорофилла-А по сцене акватории составляет около 17%. В этом случае значение уровня шума приближается к величине сигнала, что негативно сказывается на задачи определения мест повышенной концентрации хлорофилла-А.

Основной причиной низкого значения сигнально-шумовой характеристики является высокий уровень фотонного шума [21], поэтому повышение отношения сигнал/шум в ГСК является необходимым условием успешного определения параметров прибрежных аквасистем.

1.2. Гиперспектральная аппаратура

Особенностью гиперспектральных методов съемки заключается в том, что данные ГСК по сравнению с классической информацией дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) содержат сведения даже о незначительных изменениях физико-химических параметров объектов на Земной поверхности. Переход от традиционных мультиспектральных средств наблюдения к гиперспектральным повышает не только количество информации, но и обеспечивает кардинально новый качественный характер регистрируемых данных.

Суть гиперспектральной съемки состоит в получении данных о Земной поверхности во многих спектральных диапазонах. В таких системах каждому элементарному наземному объекту сопоставляется ряд изображений высокого разрешения, каждое из которых снято в узком спектральном канале. Взятые вместе спектральные каналы формируют непрерывный спектр в широком диапазоне длин волн. То есть к двум «стандартным» пространственным координатам изображения добавляется еще одна дополнительная координата, спектральная.

1.2.1. Существующие и разрабатываемые образцы гиперспектральных камер космического базирования

Первым прибором, реализующим современные принципы построения гиперкуба данных, является разработанный в США в середине 1970 годов "Scanning Imaging Spectroradiometer" (SIS). SIS проводил съемку объектов в 32 спектральных каналах со спектральным разрешением 15 нм и общим спектральным диапазоном 430-800 нм.

В 1987 году группой инженеров NASA из лаборатории реактивного движения (Jet Propulsion Laboratory) был разработан авиационный гиперспектрометр видимого и инфракрасного диапазона спектра (AVIRIS). Аппаратура регистрировала спектр от одного пикселя с проекцией на Земную поверхность 20x20 метров. Сканирование вдоль направления движения

выполнялось за счет движения носителя, а поперек за счет расположенного перед входным зрачком поворотного зеркала. Развёртка осуществлялась на 644 пикселей, а частота сканирования составляла 12 Гц. При этом угол сканирования составлял 30° с полосой захвата 10 км.

За последние 15-20 лет за рубежом (преимущественно в США) реализовано несколько десятков гиперспектральных камер космического базирования, наиболее успешными являются проекты по разработке камер: Hyperion (High Resolution Hyperspectral Imager), спутник EO-1, NASA; и HICO (Hyperspectral Imager for the Coastal Oceans), Naval Research Laboratory. В Таблице 1.3 выборочно представлены наиболее значимые существующие и планируемые образцы гиперспектральных камер космического назначения [22].

Таблица 1.4. «*push-broom*» гиперспектральные камеры космического базирования

Прибор	Организация (Страна)	Проекция пикселя на подстилающую поверхность (м)	Ширина полосы обзора (км)	Диапазон длин волн (нм)	Спектральное разрешение (нм)	Сигнал/шум	Год запуска
EO-1/Hyperion	NASA (USA)	30	7.5	400-2500	10	140-190@550-700нм 96@1225нм 38@2125нм	2000
PROBA/CHRIS	Europe	18/36	14	400-1050	5-12	200	2001
HICO	NASA (USA)	100	50	380-1000	5	250	2009
ГСК МКА-ФКИ ПН1	Роскосмос, Лептон (Россия)	52	42	400-1000	3@ 500нм 5@700нм 15@900нм	130@500нм 125@700нм 85@900нм	2012
Ресурс-П	КМЗ (РФ)	30	25	400-1100	1.5-10		2013
HISUI	METI (Japan)	30	30	400-2500	10 (VNIR)/ 12.5 (SWIR)	450 @620нм 300 @2100нм	2016
PRIZMA	ASI (Italy)	30	30	400-2500	12	600 @650нм 200 @2100нм	2017
EnMAP	DLR/GFZ (Germany)	30	30	420-2450	5/10 (VNIR) 10 (SWIR)	1000 @495нм 495 @2200нм	2018
HYPXIM-P	CNES (France)	8	16	400-2500	10	250 (VIS) 133 (SWIR)	2019
SHALOM	ISA/ASI (Israel/Italy)	10	10	400-2500	10	200 (VNIR) 100 (SWIR)	2020

FLORIS/FLEX	ESA	300	100-150	500-780	0.3-3.0	1600	2018
GEO-CAPE	NASA (USA)	375		340-890	5	1000 (380-800 нм)	2020

Гиперспектральная съемка позволяет решать большой спектр задач наблюдения, для решения каждой задачи выбирается ГСК с определенными характеристиками работы. Комплексный подход к идеологии построения космических гиперспектрометров показывает, что приборы, с точки зрения решения прикладных задач наиболее корректно, сортировать на три класса:

- высокого пространственного разрешения менее 10 м (HYPXIM-P, SHALOM), но низкой сигнально-шумовой характеристикой;
- среднего пространственного разрешения около 30 м (HISUI, PRIZMA, EnMAP), и средней величины сигнально-шумовой характеристики;
- низкого пространственного разрешения более 100 м (FLORIS/FLEX, GEO-CAPE), но высокой оперативностью получения данных и высокой сигнально-шумовой характеристикой.

Отметим, что до настоящего момента практически все существующие ГСК космического базирования относятся ко второму классу, и только в последние несколько лет появились проекты, которые расширяют стандартные границы использования гиперспектральных камер. Первое направление развития состоит в создании ГСК, обладающих высоким пространственным разрешением. Такие приборы позволяют решать задачи детального обнаружения и распознавания объектов с применением спектральной дифференциации (обнаружение утечек газопроводов, обнаружение локальных источников загрязнений и др.).

Другие планируемые образцы ГСК предназначены для решения задач, в которых характерный пространственный размер составляет несколько сотен метров (исследование водного пространства, съемка ледяного покрова и др.). За счет низкого пространственного разрешения значительно повышаются свето-сигнальные характеристики аппаратуры. Так, для выше обозначенных систем

(Таблица 1.4) величина отношения сигнал/шум достигает 1000-1500. Поэтому именно в таких системах проводится полноценный спектральный анализ, а итогом являются высокоточные измерения карт биофизических параметров.

1.2.2. Устройство «*push-broom*» гиперспектральных камер

Подавляющее большинство космических ГСК, в том числе и все указанные выше приборы, регистрируют информацию в виде солнечного излучения, отражённого от зондируемого объекта на подстилающей поверхности в нескольких десятках (до 200) узких спектральных каналах видимого и ближнего инфракрасного диапазонов (от 350 до 2400 нм) в режиме «*push-broom*» (метлой по курсу).

В работе [23] представлена общепринятая классификация других принципов построения ГСК, кратко перечислим основные из них:

- «оконная съемка», где каждое окно отвечает за свой спектральный канал. Наиболее распространенной реализацией оконной съемки является использование наборного интерференционного фильтра, нанесенного на матрицу фотоприемного устройства (ФПУ) [24] [25] [26].

- съемка при помощи акустооптического фильтра, при кадровом сканировании позволяет производить спектральное разложение за счет выделения требуемого спектрального канала. Гиперспектральные камеры, использующие данный тип фильтров, например, разработанные специалистами ИКИ, использовались для исследования Венеры, Марса и Земли [27], [28], [29].

В отличие от других принципов построения гиперспектральных камер, в том числе перечисленных выше, технология «*push-broom*» получила наиболее широкое распространение в виду следующих преимуществ:

- производится одномоментная съемка всей кривой спектральной яркости объекта, знание которой позволяет более эффективно проводить спектральный анализ объектов;

- камеры обладают высоким спектральным разрешением и низкой корреляцией между спектральными каналами;
- отсутствуют подвижные элементы конструкции, сканирование осуществляется за счет движения носителя.

Принцип действия камеры с «*push-broom*» заключается в использовании ограничивающей щели, которая пропускает излучение только от выделенного линейного участка подстилающей поверхности. После прохождения светом плоскости щели спектральный блок осуществляет спектральное расщепление выделенного излучения. На Рисунке 1.3 показан авиационный «*push-broom*» гиперспектрометр разработка проводилась с непосредственным участием автора (в том числе расчет оптической схемы) в компании АО «НПО «Лептон», г. Зеленоград. Основными элементами ГСК являются: входной объектив, щель, спектральный блок (состоящий из коллимационного объектива, диспергирующего элемента и выходного объектива) и кадровое фотоприемное устройство.

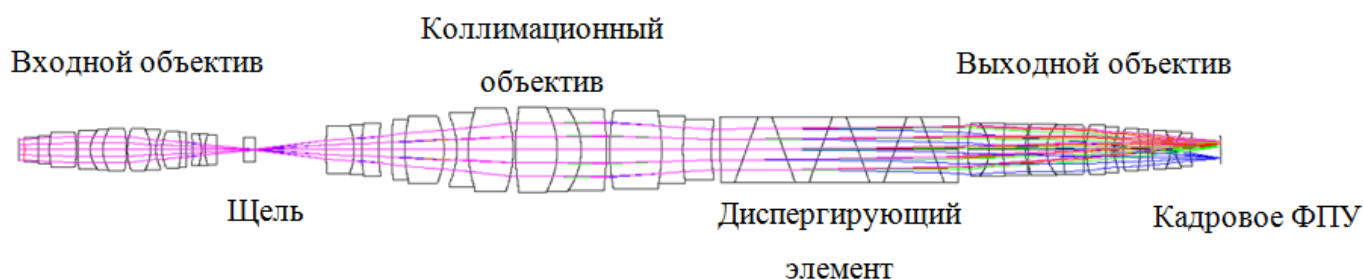


Рисунок 1.3. «*push-broom*» гиперспектральная камера на базе призмного диспергирующего элемента

В качестве диспергирующего элемента в ГСК выступает либо призма [30], либо дифракционная решетка [31]. Из [32] известно, что призма осуществляет спектральное разложение именно плоского фронта, поэтому в случае построения камеры на базе такого элемента спектральный блок обычно состоит из пары объективов. Принято называть объектив, коллимирующий излучение, коллимационным, а объектив, собирающий излучение на плоскость ФПУ, выходным.

В случае использования дифракционной решетки задача построения оптической схемы упрощается, так как сама решётка может быть нанесена на зеркальную поверхность, обладающую оптической силой. Самыми популярными оптическими схемами, используемыми при построении проекционного объектива в гиперспектрометрах, являются схема Оффнера и Дайсона, Рисунок 1.4.

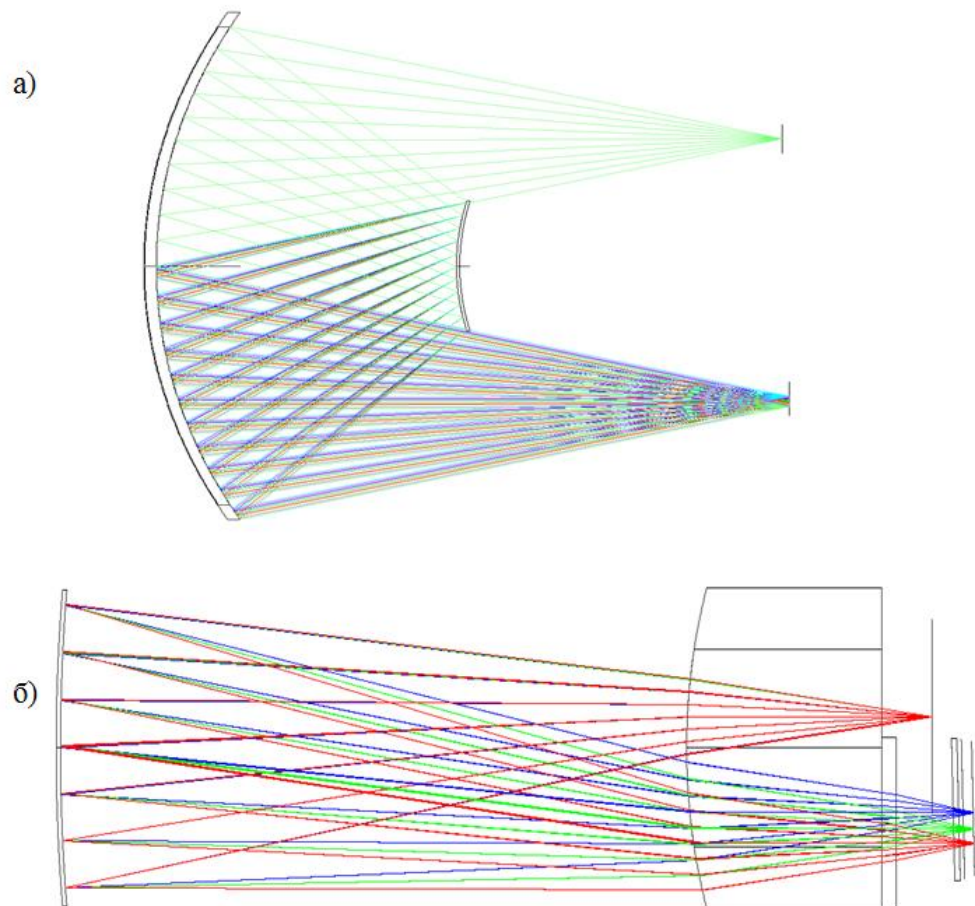


Рисунок 1.4. Модельные изображения проекционных схем а) Оффнера и б) Дайсона, выполненные в программной среде Zemax

В щелевых приборах камера одновременно обеспечивает съемку лишь по одной координате, вдоль щели, другая координата фотоприемного устройства, поперек щели, отвечает за спектральное разложение. Таким образом, получаемое изображение состоит из набора последовательных кадров, каждый кадр в котором является спектральным разложением выделенной линейки. Рассматриваемый набор кадров называется гиперкубом данных и показан на Рисунке 1.5.

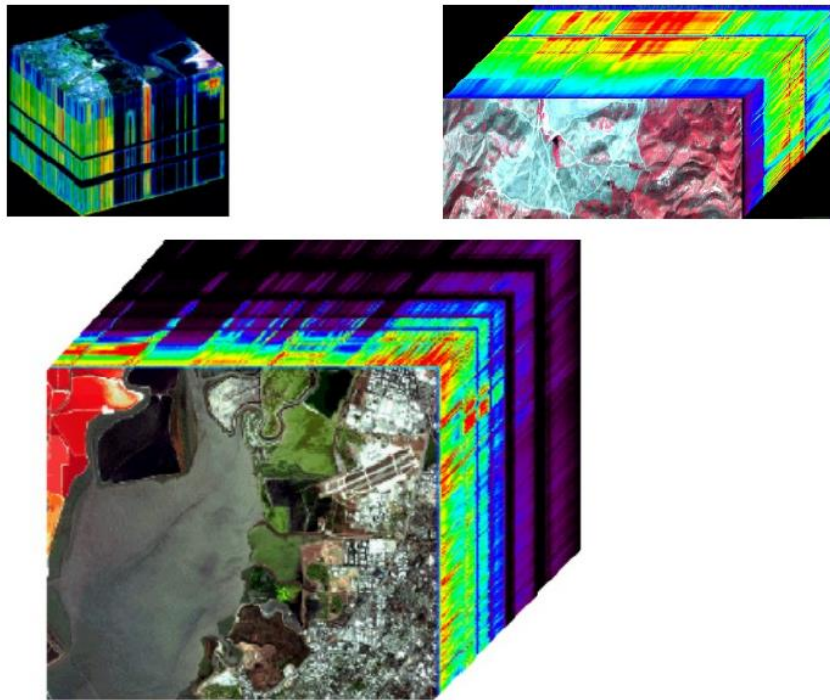


Рисунок 1.5. Гиперкуб данных щелевой гиперспектральной камеры

Отметим также, что в совокупности с очевидными преимуществами такой гиперспектральной съемки она обладает некоторыми недостатками.

- Из-за большого количества спектральных каналов, а также щелевой структуры построения такая система обладает относительно низкой энергетической чувствительностью.

- Так как выходная информация ГСК представляется в виде последовательности кадров, в которых одна координата отвечает за пространственное разложение поперек вектора скорости полета, а другая характеризует спектральное разложение, то в таких системах невозможно использовать стандартные ПЗС-матрицы с временной задержкой и накоплением (ВЗН). Метод ВЗН и схожий метод электронного отслеживания на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы будет подробно рассмотрен в главе 3 данной работы.

В виду перечисленных выше особенностей, разработка методов и алгоритмов, направленных на увеличение чувствительности является важным направлением развития «*push-broom*» гиперспектральных систем.

1.3. Основной показатель качества работы ГСК, сквозное частотно-энергетическое уравнение

Если говорить о существующих технологиях обработки гиперспектральных данных, можно констатировать, что в подавляющем большинстве случаев в существующих ГСК космического базирования разработчики измеряют и контролируют только отношение сигнал/шум $SNR(\nu=0)$ без привязки к уровню частотных искажений (HICO, HIS EnMap, ГСК Ресурс-П).

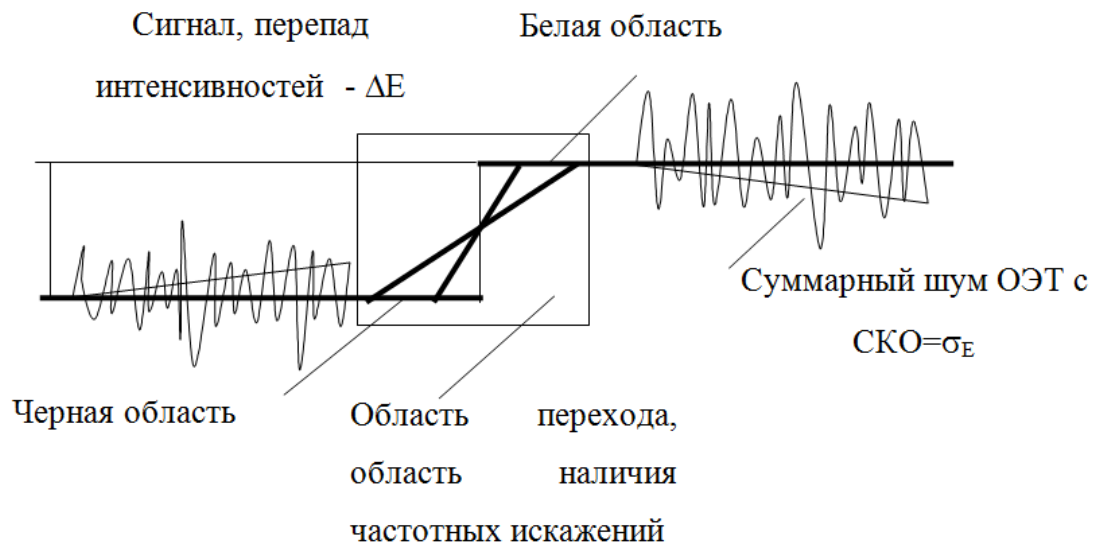


Рисунок 1.6. Изображение черно-белого перехода. Область наличия частотных искажений не учитывается при определении отношения сигнал/шум на нулевой частоте (стандартное понимание характеристики).

В стандартном понимании отношение сигнал/шум $SNR(\nu=0)$, описывает энергетические и шумовые свойства прибора на нулевой пространственной частоте. Аналитическим описанием объекта с нулевой пространственной частотой (черно-белого перехода) является функция Хевисайда. Для измерения $SNR(\nu=0)$ исследуется изображение этой функции, которое можно условно разделить на «белую» область, «черную» область, а также область наличия частотных искажений, см. Рисунок 1.6. При исследовании $SNR(\nu=0)$ область перехода

функции не учитывается, а используются отдаленные области белого и черного уровней изображения.

В свою очередь, анализ изображения неразрывно связан с частотной областью перехода или пространственно-частотной характеристикой прибора. А одним из основных показателей качества работы аппаратуры наряду со спектральным разрешением является пространственное разрешение прибора.

Оценка величины пространственного разрешения на местности необходима при проектировании и разработке гиперспектральных оптико-электронных систем наблюдения. Правильный выбор технологических и конструктивных решений позволит разработать необходимую систему, позволяющую решить поставленные прикладные задачи.

Величина пространственного разрешения ограничивает диапазон объектов и задач для мониторинга. Существуют добротные и апробированные исследования по оценке пространственного разрешения, но они касаются исключительно панхроматических или мультиспектральных систем наблюдения [33]. Далее предлагается адаптировать известные подходы для использования в гиперспектральных системах. Величина пространственного разрешения на местности определяется путем решения сквозного частотно-энергетического уравнения (СЧЭУ) (1.1). Это уравнение отражает функциональную зависимость основных параметров аппаратуры, объекта наблюдения, условий наблюдения и характеристик анализатора изображения.

В соответствии с наиболее общепринятым подходом [34] [35] [36] [37], СЧЭУ уравнение имеет вид:

$$\left(\frac{4}{\pi}\right) \cdot SNR(\nu=0) \cdot \prod_{i=1}^N \Phi ПМ_i(\nu) = T_{nop}(\nu), \quad (1.1)$$

где $SNR(\nu=0)$ - отношение значения сигнала к значению шума на нулевой пространственной частоте, определяемое выражением:

$$SNR(\nu=0) = \frac{\Delta E(\nu=0)}{\sigma_E}, \quad (1.2)$$

$\Delta E(\nu=0)$ – разность сигналов между полуплоскостями черно-белого перехода с заданными уровнями альбедо, рассчитывается в количестве электронов,

σ_E – среднее квадратичное отклонение (СКО) шумовой составляющей сквозного оптико-электронного тракта (ОЭТ), рассчитывается в количестве электронов,

$\prod_{i=1}^N \Phi PM_i(\nu)$ – общая функция передачи модуляции сквозного ОЭТ, вклад в неё дают такие составляющие как: атмосфера, оптическая система, «рассогласование» скоростей бега изображения и зарядовых пакетов, «смаз» изображения, пиксель ФПУ,

$\frac{4}{\pi}$ – является коэффициентом разложения первой степени прямоугольного периодического сигнала по гармоническим функциям,

$T_{пор}(\nu)$ – пороговая частотно-энергетическая характеристика анализатора, которая описывает возможность анализатора изображений распознать объект по заданному критерию.

Уравнение записывается относительно переменной ν . Найденное в процессе решения уравнения значение ν является предельно разрешимой частотой тест-объекта, которая определяет минимальный распознаваемый системой размер и зависит от набора параметров системы. Использование СЧЭУ позволяет оценить как эффективность влияния отдельной характеристики системы на предельную частоту, так и подобрать оптимальный баланс параметров путем нахождения минимума функции разрешения.

Из (1.1) видно, что произведение частотной и сигнально-шумовой характеристики вносит вклад в определение предельно разрешимой пространственной частоты, поэтому в данной работе в качестве основного показателя эффективности функционирования гиперспектральной камеры предлагается использование общей характеристики:

$$SNR(\nu) = SNR(\nu = 0) \cdot \prod_{j=1}^M \Phi PM_{ГСК,j}(\nu), \quad (1.3)$$

где

$$\prod_{j=1}^M \Phi PM_{ГСК,j}(\nu) = \Phi PM_{об}(\nu) \cdot \Phi PM_{микс}(\nu) \cdot \Phi PM_{см}(\nu) \cdot \Phi PM_{рс}(\nu), \quad (1.4)$$

– общая функция передачи модуляции камеры, в которую дают вклад: объектив, единичный элемент ФПУ, звено «смаза», звено «рассогласования» (в режиме отслеживания).

1.3.1. Сигнально-шумовые характеристики тракта ГСК космического базирования

1.3.1.1. Оценка величины полезного сигнала при заданных условиях наблюдения

Величина полезного сигнала в соответствии с Рисунком 1.5:

$\Delta E = E_e - E_n$, где E_e, E_n – величины накопленного в ФПУ сигнала от верхнего и нижнего бьефа, выраженные в количестве электронов.

Для гиперспектральных систем формула априорного расчета величины сигнала отличается от стандартной зависимости для панхроматических или мультиспектральных камер [35] [36] тем, что:

- эффективное фокусное расстояние определяется входным объективом, а не общим фокусным расстоянием как в панхроматических или мультиспектральных камерах,

- в качестве элементарного размера (дискретизации) вдоль вектора скорости полета выступает ширина щели,

- в определении сигнала в спектральном канале участвует его нормированная чувствительность (для оценочного вычисления величины сигнала часто используется прямоугольная функция пропускания с центральной длиной волны, соответствующей центру спектрального канала и шириной функции,

равной ширине спектрального канала). В панхроматической камере в виду отсутствия спектральных каналов учет такой характеристики не производится.

Таким образом, величина сигнала от объекта подстилающей поверхности Земли с коэффициентом альбедо $\rho(\lambda)$ для гиперспектральных систем наблюдения выражается законом:

$$E_{\rho,i} = \left(\frac{1}{4}\right) \cdot \left(\frac{1}{hc}\right) \cdot \left(\frac{D}{F_{\text{вх}}}\right)^2 \cdot (1 - k_{\text{экp}}^2) \cdot \Delta_x \cdot \Delta_{\text{щ}} \cdot T_H \cdot \int_0^{\infty} (E_z(\lambda) \cdot K_n(\lambda) \cdot K_i(\lambda) \cdot \rho(\lambda) \cdot \lambda) d\lambda + E_{\text{dark}}, \quad (1.5)$$

где

$E_{\rho,i}$ – сигнал от исследуемого объекта с коэффициентом альбедо $\rho(\lambda)$ в i -м спектральном канале камеры,

$D, k_{\text{экp}}$ – диаметр входной апертуры и величина экранирования оптической схемы (ОС),

$F_{\text{вх}}$ – фокусное расстояние входного объектива ГСК,

h – постоянная Планка,

c – скорость света,

λ – длина волны,

$K_n(\lambda)$ – суммарный спектральный коэффициент пропускания, учитывающий влияние атмосферы [38], ОС и квантовый выход фотоприемника,

Δ_x – проекция размера пикселя ФПУ поперек направления полета в плоскости щели,

$\Delta_{\text{щ}}$ – ширина щели ГСК,

$T_H = \frac{k_{\text{см}} \cdot \Delta_{\text{щ}}}{V_{\text{б.и.}}}$ – время накопления, а $k_{\text{см}}$ – коэффициент величины «смаза»

изображения за время накопления (явление «смаза» изображения вызывается движением объекта съемки или аппарата при экспонировании), $V_{\text{б.и.}}$ – скорость бега изображения по плоскости щели,

$E_z(\lambda)$ – спектральная облученность Земной поверхности,

E_{dark} – сигнал темнового тока ФПУ,

$K_i(\lambda)$ – нормированная чувствительность i -го канала гиперспектральной камеры.

1.3.1.2. Оценка величины суммарного шума оптико-электронного тракта

Общий шум оптико-электронного тракта состоит из нескольких составляющих и определяется в соответствии с уравнением:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{\kappa\epsilon}^2 + \sigma_{\text{э.м.}}^2}, \quad (1.6)$$

где $\sigma_n = \sqrt{\frac{E_s + E_n}{2}}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) средней величины полезного сигнала и сигнала темнового тока, описываемое распределением Пуассона [39],

$$\sigma_{\kappa\epsilon} = \frac{M}{\sqrt{12} \cdot (N_{\kappa\epsilon} - U_q)} - \text{величина СКО шума квантования АЦП, (} M - \text{ёмкость}$$

ямы ФПУ, $N_{\kappa\epsilon}$ – количество уровней квантования, U_q – уровень черного)

$\sigma_{\text{э.м.}}$ – величина суммарного интегрального шума электронного тракта ФПУ.

1.3.2. Общая функция передачи модуляции тракта космической ГСК

Распространённым методом изучения частотных параметров системы является исследование частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) прибора. Данная функция характеризуется откликом системы на воздействие тест-объекта с распределением коэффициента пропускания в виде меандра. Меандр это периодическое распределение прямоугольной формы с одинаковыми размерами «белой» и «черной» шпал. Спектром меандра является функция $\text{sinc}(x)$.

Тестовый оптический объект такого вида относительно просто воспроизводится в эксперименте, и поэтому измерение ЧКХ прибора является быстрым и точным. Но использование меандрового тест-объекта содержит в себе

принципиальный недостаток, а именно, для таких тест-объектов не выполняется

принцип суперпозиции $ЧКХ_{\Sigma} \neq \prod_{i=1}^N ЧКХ_i$, где N – общее количество независимых звеньев сквозного ОЭТ, вызывающих частотные искажения сигнала, а i – порядковый номер звена, то есть при таком подходе общую частотную характеристику не возможно разделить на составляющие отдельных звеньев.

Поэтому наиболее корректным подходом является измерение функции передачи модуляции (ФПМ) системы. ФПМ отражает способность системы передавать сигналы с гармоническим распределением яркости. Ведь именно при прохождении таких сигналов через фильтр не происходит изменения формы и частоты сигнала, а происходит изменение только амплитуды сигнала. Поэтому в данном подходе выполняется принцип суперпозиции (1.7) и он является максимально корректным с математической точки зрения при описании сложных оптико-электронных систем.

Вклад в общую $ФПМ_{\Sigma}$ сквозного оптико-электронного тракта дают несколько составляющих и $ФПМ_{\Sigma}$ выражается законом:

$$ФПМ_{\Sigma} = ФПМ_{атм} \cdot ФПМ_{об} \cdot ФПМ_{тукс} \cdot ФПМ_{рс} \cdot ФПМ_{смаза}, \quad (1.7)$$

где $ФПМ_{атм}$ – турбулентной атмосферы,

$ФПМ_{об}$ – оптической системы,

$ФПМ_{тукс}$ – единичного элемента ФПУ,

$ФПМ_{рс}$ – звена «рассогласования» изображения,

$ФПМ_{смаза}$ – звена «смаза» изображения.

Таким образом, при определении общей ФПМ добавление или удаление одного или нескольких звеньев вносящих частотные искажения производится корректно в соответствии с формулой (1.5). Далее рассмотрим отдельно некоторые звенья частотных искажений сквозного оптико-электронного тракта.

1.3.2.1. Функция передачи модуляции турбулентной атмосферы

В то время как аэрозоли и газы, присутствующие в атмосфере, влияют на суммарный коэффициент пропускания, турбулентные изменения показателя преломления приводят к перераспределению энергии в оптических пучках случайным образом [40]. Такие случайные изменения ограничивают возможности космических оптико-электронных систем наблюдения за Земной поверхностью, в соответствии с [41]:

$$\Phi PM_{atm} = \text{sinc}\left(\frac{\pi \cdot \Psi}{1 - \psi^2}\right), \quad (1.8)$$

где

$$\psi = \frac{\nu \cdot \Delta_r \cdot F \cdot H_r}{H_{ka}}, \text{ здесь}$$

Δ_r – угловой растр апертурной функции турбулентной атмосферы;

F – фокусное расстояние ОС;

H_r – высота, при которой достигается максимальное значение весовой функции дисперсии отклонения плоского фронта (≈ 14 км);

H_{ka} – высота орбиты космического аппарата.

В видимом спектральном диапазоне интенсивность турбулентности определяется следующими значениями:

$\Delta_r = 1-3$ угл. сек – слабая турбулентность;

$\Delta_r = 4-8$ угл. сек – средняя турбулентность;

$\Delta_r > 12$ угл. сек – сильная турбулентность.

1.3.2.2. Функция передачи модуляции оптической системы

Основным требованием большинства заказчиков оптической аппаратуры космического назначения является разработка и конструирование объектива камеры с качеством, близким к дифракционному. В случае, если данное требование не выполняется, для обеспечения необходимого разрешения требуется

увеличивать массогабаритные характеристики, а значит, выведение такой аппаратуры на околоземную орбиту не является коммерчески выгодным.

Дифракционная ФПМ является функцией автокорреляции [42] апертуры входного зрачка системы $p(x, y)$, с заменой координат x и y на координаты пространственных частот $\nu_x = \frac{x}{\lambda \cdot F}, \nu_y = \frac{y}{\lambda \cdot F}$. Так, для круглой апертуры без экранирования:

$$\Phi_{ПМ}(\nu) = \frac{2}{\pi} \cdot \left(\arccos\left(\frac{\nu}{\nu_{кр}}\right) - \frac{\nu}{\nu_{кр}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\nu}{\nu_{кр}}\right)^2} \right), \quad (1.9)$$

при этом $\frac{\nu}{\nu_{кр}} \leq 1$, где

$$\nu_{кр} = \frac{D_0}{\lambda \cdot F}, \quad (1.10)$$

$\nu_{кр}$ – предельная частота системы (D_0 – диаметр входного зрачка ОС, λ – длина волны, F – фокус ОС), выше этой частоты ОС не способна передать никакие сигналы [34].

Для круглой апертуры с центральным экранированием уравнение (1.9) приобретает более сложный характер и соответствующее уравнение приведено в [43].

1.3.2.3. ФПМ фотоприемного устройства

На передаточную характеристику фотоприемного устройства влияют несколько составляющих (1.11). Перечислим основные звенья, участвующие в определении суммарной ФПМ ФПУ:

- единичный элемент фотоприемника,
- «смаз» системы наблюдения,
- «рассогласование» режима отслеживания.

$$\Phi_{ПМ_{ФПУ}} = \Phi_{ПМ_{ликс}} \cdot \Phi_{ПМ_{рс}} \cdot \Phi_{ПМ_{смаза}} \quad (1.11)$$

Наиболее часто при оценке ФПМ одиночного элемента ФПУ в качестве апертурной функции (пространственной функции чувствительности) элемента выступает прямоугольная функция с пространственным размером $\Delta_{\text{пикс}}$, в этом случае ФПМ является преобразованием Фурье апертурной функции и выражается законом [33]:

$$\Phi\text{ПМ}_{\text{пикс}}(v) = \text{sinc}(\pi v \Delta_{\text{пикс}}) \quad (1.12)$$

При проведении космической съемки в реальных оптико-электронных системах наблюдения при фиксации бегущего изображения Земной поверхности всегда имеет место явление «смаза» изображения (смещения изображения за время накопления):

$$\Phi\text{ПМ}_{\text{смаза}}(v) = \text{sinc}(\pi v \Delta_{\text{смаза}}), \quad (1.13)$$

где $\Delta_{\text{смаза}} = V_{\text{б.и.}} \cdot T_n$ величина «смаза» изображения, а $V_{\text{б.и.}}$ – скорость бега изображения по ФПУ, T_n – время накопления.

Ошибки в нахождении пространственной ориентации КА, а также его недостаточная стабилизация [44] [45] влияют на значение и направление скорости бега изображения по плоскостям щелевого и, соответственно, фотоприемного устройства. В случае если камера функционирует в режиме электронного отслеживания изображения, а также присутствует рассогласование вектора скорости бега изображения и вектора скорости переноса щелей, появляются дополнительные частотные искажения. Рассогласование может возникнуть вследствие как недостаточной точности выставления скорости движения щелей, так и неодинаковой скорости бега изображения по щелевой области, особенно явно рассогласование проявляется при больших значениях углов крена и тангажа (более 45°). Более подробно тактирование щелей будет рассмотрено в части 2 работы.

ФПМ звена рассогласования определяется в соответствии с:

$$\Phi\text{ПМ}_{\text{рс}} = \text{sinc} \left(\pi v \Delta_{\text{pix}} \cdot N_{\text{зо}} \cdot \left| 1 - \frac{V_{\text{заряда}}}{V_{\text{б.и.}}} \right| \right), \quad (1.14)$$

где $N_{\text{эо}}$ – количество шагов электронного отслеживания ФПУ, $V_{\text{заряда}}$ – скорость переноса зарядового информационного пакета.

1.3.3. Используемый в работе метод измерения функции передачи модуляции ГСК

Функция передачи модуляции является важной характеристикой, определяющей частотное качество прибора. ФПМ характеризует способность системы передавать сигналы интересующей нас частоты без искажения. В качестве тестовых, базисных сигналов при вычислении ФПМ используются сигналы с гармоническим распределением коэффициента пропускания.

ФПМ является относительным параметром качества системы, равным отношению коэффициента передачи контраста для тест-объекта с гармоническим законом коэффициента пропускания на рассматриваемой частоте к коэффициенту передачи контраста на нулевой пространственной частоте.

$$\Phi_{\text{ПМ}}(\nu) = \frac{(E_{\text{max}} - E_{\text{min}}) / (E_{\text{max}} + E_{\text{min}})}{(L_{\text{max}} - L_{\text{min}}) / (L_{\text{max}} + L_{\text{min}})}, \quad (1.15)$$

где $E_{\text{max}}, E_{\text{min}}$ – максимальная и минимальная освещенности итогового изображения, а $L_{\text{max}}, L_{\text{min}}$ – исходная максимальная и минимальная яркость гармонического тест-объекта.

В реальных оптико-электронных системах всегда присутствуют искажения, связанные с неидеальностью изготовления оптических компонентов, процесса сборки и итоговой юстировки прибора. Такие искажения влияют на итоговое значение ФПМ системы. При проведении процесса юстировки компонент объектива ориентиром максимального уровня функции передачи модуляции объектива служит рассчитанная при проектировании оптической схемы характеристика (1.2.2.2).

Так как реальное значение ФПМ всегда лежит ниже расчётной характеристики, то при изучении оптического тракта необходимо произвести её экспериментальное измерение. Реализация корректного и достоверного измерения исследуемой характеристики является довольно сложной и кропотливой задачей, поэтому существует целый набор методик измерения, предназначенных для использования в разных оптических системах и при различных условиях наблюдения [46] [47] [48] [49] [50] [51] [52] [53].

К основным методам измерения ФПМ относятся: фурье-преобразование отклика системы на точечный источник, измерение с помощью “наклонного ножа”, измерение по сложным тест-объектам с переменными значениями частот вдоль поля зрения [32] [54] [55] [56] [57] [58] [59]. Данные методики являются экспресс-методами оценки величины ФПМ и не отвечают повышенным требованиям устойчивости измерения к дефектам различного рода, таким как угловая и пространственная неравномерность засветки тест-объекта, горячие пиксели ФПУ, неравномерность чувствительности ФПУ, и др.

В данной работе для определения ФПМ в качестве тест-объекта выступала длинная, более 50-ти периодов, мира постоянной частоты, Рисунок 1.7. Измерение с таким тест-объектом является наиболее устойчивой к различным дефектам из-за большого количества используемых данных. Негативным моментом такого измерения является вычисление характеристики только для одной выбранной частоты. Таким образом, выбранный подход обладает высокой точностью, но является достаточно кропотливым относительно перечисленных выше аналогов.

Предлагаемый тест-объект обладает прямоугольным законом распределения коэффициента пропускания и скважностью 2. Заметим, что использование таких тест-объектов более характерно при определении ЧКХ прибора, но для многих оптико-электронных камер отклик системы именно на такой тест объект с

точностью до коэффициента пересчета будет определять величину функции передачи модуляции.

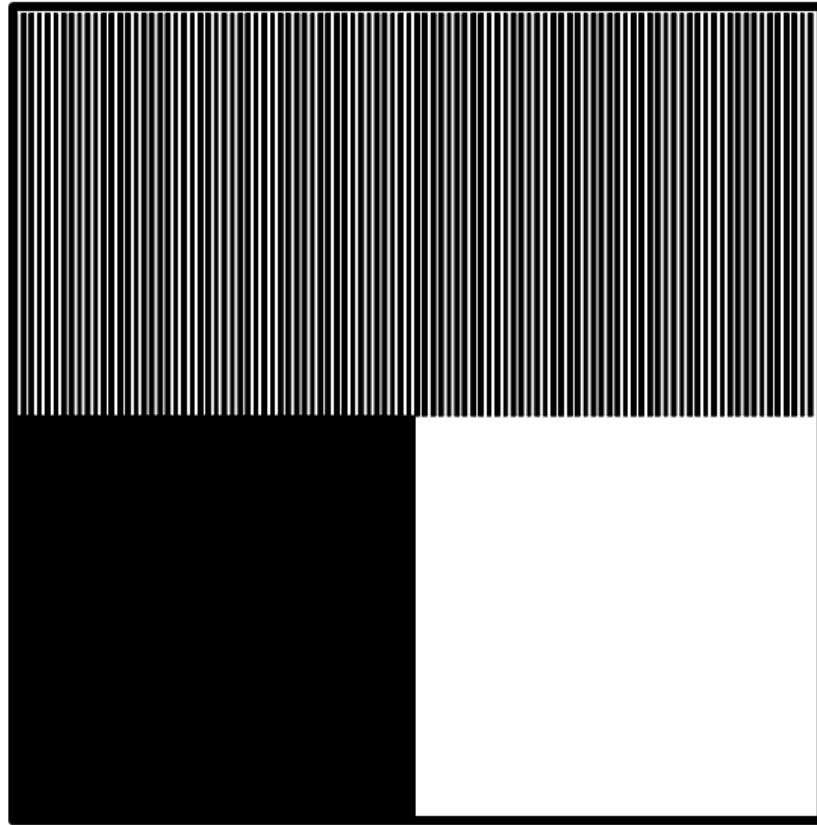


Рисунок 1.7. В качестве тест-объекта выступает: длинная периодическая мира с прямоугольным законом распределения коэффициента пропускания и черно-белый переход

Для определения коэффициента пересчета и границы применимости данного подхода произведем разложение функции пропускания тест-объекта в ряд по гармоническим функциям:

$$f(x) = \frac{4}{\pi} \cdot \left(\sin(2\pi\nu x) + \frac{1}{3} \cdot \sin(3 \cdot 2\pi\nu x) + \frac{1}{5} \cdot \sin(5 \cdot 2\pi\nu x) + \dots \right), \quad (1.16)$$

При увеличении частоты следования сигнала коэффициент передачи контраста уменьшается, а при определенном критическом значении $\nu_{кр}$ (1.10) становится равным нулю (явление дифракции). Поэтому при определенных

значениях частоты $\nu > \frac{1}{3}\nu_{кр}$ вклад будет вносить только первое слагаемое $\sin(2\pi\nu x)$ формулы, и коэффициент пересчета равняется $\frac{4}{\pi}$. Отметим, что наиболее информативным диапазоном частот, при которых решается СЧЭУ, является диапазон средних и высоких пространственных частот, для которых применим описанный выше метод.

Опишем далее основные шаги измерений, которые использовались для экспериментально нахождения ФПМ в данной работе.

- 1) Сигнал от изображения тест-объекта аппроксимируем гармоническим сигналом с учетом линейной неравномерности освещения:

$$S(x) = A + B \cdot x + C \cdot \sin(\pi \cdot \nu \cdot x + \varphi), \quad (1.17)$$

где A, B, C, ν, φ – параметры аппроксимации значения постоянной составляющей, линейной составляющей, амплитуды, пространственной частоты и фазы выходного сигнала.

- 2) Определяем максимальный и минимальный сигнал изображения для частоты ν : $S_{\max}(\nu) = A + C, S_{\min}(\nu) = A - C$

$S_{\max}(0), S_{\min}(0)$ максимальный и минимальный сигнал на чёрно-белом переходе.

- 3) Находим коэффициенты передачи контраста на выбранной частоте (ν) и нулевой частоте:

$$K(\nu) = \frac{S_{\max}(\nu) - S_{\min}(\nu)}{S_{\max}(\nu) + S_{\min}(\nu)}$$

$$K(0) = \frac{S_{\max}(0) - S_{\min}(0)}{S_{\max}(0) + S_{\min}(0)}$$

- 4) В соответствии с (1.15) и (1.17) находим ФПМ:

$$\Phi_{ПМ}(\nu) = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{K(\nu)}{K(0)}, \quad (1.18)$$

Использование приведенного метода позволяет произвести измерение частотной характеристики с высокой степенью устойчивости к дефектам различного рода.

1.3.4. Пороговая частотно-энергетическая характеристика (ПЧЭХ) анализатора изображения

При решении общей задачи выделения объектов на изображении помимо аппаратных характеристик связанных с прибором, необходимо учесть сам механизм распознавания. Механизм функционально представляется пороговой частотно-энергетической характеристикой (ПЧЭХ), которая описывает нелинейные свойства анализатора изображения. Без учета этой зависимости описание СЧЭУ будет неполным.

ПЧЭХ определяется как параметрами объекта изучения, так и свойствами оптического тракта [60] [61]. В стандартном подходе в качестве тест-объекта для дешифрования используется набор из четырёх пяти-шпальных мир, повернутых под разными углами, Рисунок 1.8 [36]. В работе [62] исследована связь разрешения такой миры с реальными объектами наблюдения. То есть такая мира является стандартизованным эквивалентом объекта исследования. Качество распознавания характеризуется максимальной разрешаемой частотой миры, которая обладает контрастом объекта, при наблюдении объектов в эквивалентных условиях.

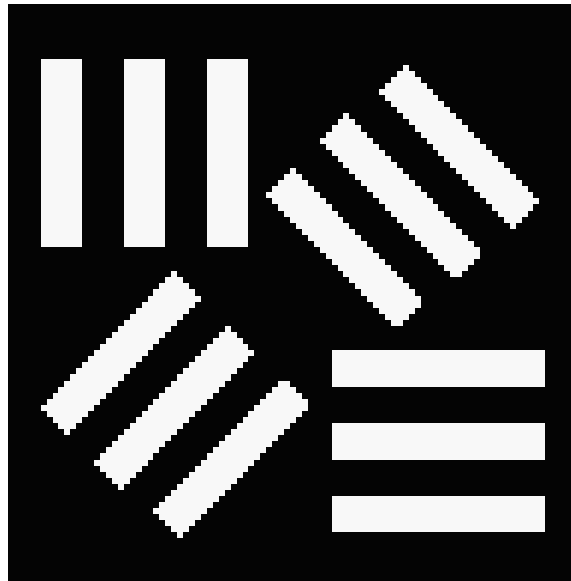


Рисунок 1.8. Стандартный тест-объект для распознавания

Пороговая частотно-энергетическая характеристика описывает частотно-энергетические свойства звена выборки, визуализатора и зрительного анализатора единой функциональной зависимостью. Данная характеристика определяется экспериментальным путем и представляет собой пороговое значение отношения сигнала к уровню шума (отношение сигнал/шум), при котором изображения начинают распознаваться. Заметим, что требуемое значение определяется исходя из обеспечения необходимой вероятности распознавания объекта по выбранному критерию. Также стоит отметить, что влияние фазы выборки корректно учитывается ПЧЭХ, так в работе такая характеристика принимает вид [63]:

$$T_{\text{пор}}(\chi) = -0.4 + 16.5\chi - 37.9\chi^2 - 176.7\chi^3 + 1277.2\chi^4 - 2672.6\chi^5 + 2030.5\chi^6, \quad (1.19)$$

где χ – обобщенная пространственная частота ($\nu\Delta$), а Δ – размер элемента ФПУ.

Указанная зависимость (1.19) описывает пороговую частотную характеристику анализатора в случае (критерий разрешения):

- объект распознан, если в нем разрешается хотя бы одна из четырех пяти-шпальных пар разного наклона,

- мира считается распознанной, если в её изображении можно сосчитать число штрихов, число штрихов совпадает с видимым числом штрихов, между соседними штрихами допускается наличие перемычек, но размеры перемычек не превышают периода штрихов и отсутствуют перемычки между несмежными штрихами [63].

Выводы по Главе 1

Показано, что для решения задач количественного восстановления характеристик природных аквасистем в последнее время используются и разрабатываются специализированные ГСК, ключевые технические характеристики которых (пространственное и спектральное разрешение, фокус и светосила объектива) сбалансированы для решения конкретной задачи. Однако, в условиях низкой освещенности или невысоком содержании оптически активных веществ в водной толще, использование даже таких специализированных камер может приводить к обусловленным низким значениям отношения сигнал/шум ГСК и значительным ошибкам при восстановлении требуемых характеристик аквасистем.

Современные гиперспектральные оптико-электронные системы космического базирования широко используются для решения задач спектрального анализа объектов на Земной поверхности. Для проведения полноценного спектрального анализа наиболее предпочтительным является использование архитектуры построения **«push-broom»**. Наряду со спектральным разрешением, важным показателем качества работы аппаратуры является пространственное разрешение прибора. Предельная частота разрешения объекта с заданным критерием распознавания определяется из сквозного частотно-энергетического уравнения. В данном уравнении участвуют две основные характеристики, отвечающие за энергетические и частотные свойства прибора:

- Отношение сигнала к шуму на нулевой пространственной частоте. Этот параметр является общей характеристикой, отвечающий за энергетическую эффективность и шумовые свойства прибора.

- Функция передачи модуляции, которая служит для описания способности сквозного оптико-электронного тракта передавать сигналы с гармоническим законом распределения. Рассматриваемая характеристика учитывает частотные искажения, вызванные влиянием атмосферы, оптической системы, апертуры пикселя ФПУ, «рассогласования», «смаза» и др. Реализованная и используемая в данной работе методика экспериментального измерения ФПМ основана на использовании в качестве тест-объекта длинной периодической миры. Измерения по данной методике являются наиболее устойчивыми к влиянию дефектов различного рода: угловой и пространственной неравномерности засветки тест-объекта, горячим пикселям ФПУ, неравномерности чувствительности и др.

В данной главе предлагается использование в качестве основного показателя качества работы не стандартное отношение сигнала к шуму, а расширенный показатель: общую частотную сигнально-шумовую характеристику. Такая характеристика отражает изменение, как энергетической эффективности прибора, так и частотных передаточных свойств. А, следовательно, такой подход позволяет наиболее корректно производить сравнение различных методов работы и образцов ГСК.

Глава 2 Метод комбинированного отслеживания изображения (КОИ) «*push-broom*» гиперспектральной камеры

В последние годы происходит бурное развитие и внедрение в мировую практику гиперспектрального метода съемки Земной поверхности. В подавляющем большинстве случаев используется подход «*push-broom*» к формированию гиперспектральных данных (заметания щелью по курсу). Однако используемая гиперспектральная аппаратура обладает невысокой энергетической чувствительностью, поэтому основная задача данной главы состоит в разработке метода, который позволит значительно увеличить чувствительность ГСК с одновременным сохранением показателя информативности и без использования подвижных крупногабаритных элементов в конструкции.

2.1. Предпосылки создания ГСК с КОИ

2.1.1. Функциональная зависимость величины полезного сигнала от проекции пикселя на подстилающую поверхность

Рассмотрим динамику изменения и совершенствования характеристик космических гиперспектрометров. Так, одним из наиболее успешных ГСК является прибор *Hyperion*, запущенный в 2000 году, со следующими параметрами: пространственное разрешение 30 метров, спектральное разрешение 10 нм. В последние 15 лет после запуска этого прибора не произошло существенного улучшения характеристик пространственного и спектрального разрешения. Это связано с принципиальными ограничениями используемой архитектуры построения и функционирования щелевых гиперспектральных камер.

Рассмотрим факторы, препятствующие улучшению пространственного и спектрального разрешения. Для этого запишем функциональную зависимость

величины сигнала $S(T_i, \Delta, D)$ от времени накопления T_i , проекции пикселя на Земную поверхность Δ и диаметра входного зрачка системы D .

$$S(T_i, \Delta, D) \sim T_i \cdot \Delta^2 \cdot D^2 \quad (2.1)$$

Величина «смаза» изображения составляет не более чем один пиксель, поэтому:

$$T_i = \frac{\Delta}{V_{n.m.}}, \quad (2.2)$$

где $V_{n.m.}$ – скорость подспутниковой точки по направлению визирования.

Таким образом, из (2.1) и (2.2):

$$S(\Delta, D) \sim \Delta^3 \cdot D^2 \quad (2.3)$$

При использовании гиперспектрометра в контексте космической съемки Земной поверхности, на камеру накладываются следующие ограничения.

1) Любая оптико-электронная аппаратура космического назначения рассчитывается и проектируется с дифракционным качеством оптики. То есть присутствует лишь незначительное (не более 30-50%) понижение качества оптической системы относительно её дифракционной характеристики. Данное требование возникает из-за высокой стоимости выведения полезной нагрузки на околоземную орбиту. Поэтому в соответствии с формулой (1.8):

$$\nu_o = k \cdot \nu_{кр} = k \cdot \frac{D}{\lambda \cdot F}, \quad 0.4 \leq k \leq 0.8, \quad (2.4)$$

где ν_o – частота дискретизации в плоскости ФПУ,

k – коэффициент, характеризующий переход предельной дифракционной частоты оптической системы $\nu_{кр}$ в диапазон рабочих частот ν_o , λ – средняя длина волны оптического диапазона.

2) В уже существующих оптических системах космического базирования используются предельные значения светосилы аппаратуры. То есть совершенствование ГСК только лишь за счет увеличения светосилы прибора $\left(\frac{D}{F}\right)$ не является эффективным способом повышения разрешающей способности:

$$\frac{D}{F} = const \quad (2.5)$$

3) Из уравнений (2.4-2.5) следует, что размер пикселя с учётом перечисленных ограничений:

$$\Delta_{pix} = \frac{1}{\nu_o} = const \quad (2.6)$$

Физический смысл формулы заключается в том, что размер пикселя соответствует размеру дифракционного пятна и дальнейшее уменьшение размера пикселя не является целесообразным.

4) Так как $\frac{\Delta_{pix}}{\Delta} = \frac{F}{H}$, (H - высота орбиты КА) с учетом (2.6) и при одинаковой высоте H следует, что:

$$F \sim \frac{1}{\Delta} \quad (2.7)$$

Итак, с учетом (2.3, 2.5, 2.7), зависимость сигнала от проекции пикселя выражается линейным законом:

$$S \sim \Delta^3 \cdot D^2 = \Delta \cdot (\Delta^2 \cdot D^2) \sim \Delta \cdot \left(\frac{D}{F}\right)^2 \sim \Delta \quad (2.8)$$

Уравнение (2.8) отражает функциональную зависимость величины полезного сигнала от проекции пикселя на Земную поверхность. Основное ограничение, связанное с невозможностью существенного увеличения разрешающей способности ГСК состоит в том, что при использовании ГСК с меньшей проекцией пикселя на подстилающей поверхности, при тех же условиях наблюдения и характеристиках объекта наблюдения, в пропорциональное количество раз происходит уменьшение полезного сигнала. Также очевидно, что аналогичная ситуация наблюдается и для спектрального разрешения: $S \sim \Delta_{\text{спектр}}$, где $\Delta_{\text{спектр}}$ - спектральная ширина канала. В связи с этим, существует некий предельный набор тактико-технических параметров ГСК, выход за который без

реализации дополнительных мер по увеличению энергетической чувствительности затруднен.

2.1.2. Поведение частотной и энергетической характеристик ГСК при уменьшении проекции пикселя на подстилающую поверхность

Увеличение общей функции передачи модуляции $\Phi_{ПМ_\Sigma}(\nu \cdot \nu_{ПМ})$

Уменьшение проекции пикселя в соответствии с пунктом 2.1.1. достигается за счет общего масштабирования оптической системы без изменения размеров единичного элемента ФПУ. При таком подходе происходит сжатие оси частот на величину, пропорциональную изменению фокусного расстояния системы

$$\Phi_{ПМ_\Sigma}(\nu \cdot \nu_{ПМ}) = \Phi_{ПМ_\Sigma}\left(\frac{F \cdot \nu_d \cdot \nu}{H}\right), \quad (2.9)$$

где $\nu_{ПМ} = \frac{1}{\Delta}$ – частота дискретизации на подстилающей поверхности,

ν – измеряется в долях частоты $\nu_{ПМ}$.

Другими словами, при увеличении фокусного расстояния и диаметра входного зрачка, такому же размеру пикселя фотоприемного устройства соответствует меньшая проекция на подстилающей поверхности. При этом ФПМ в плоскости фотоприемника остается такой-же, а в плоскости подстилающей поверхности сетка растягивается и ФПМ увеличивается.

Уменьшение сигнально-шумовой характеристики $SNR(\nu = 0)$

Отношение значения уровня сигнала к уровню шума определяется в соответствии с формулой:

$$SNR(\nu = 0) = \frac{\Delta S(\nu = 0)}{\sigma_E}, \quad (2.10)$$

где $\Delta S(\nu = 0)$ – разность сигнала от полуплоскостей функции черно-белого перехода с заданными альбедо её бьёфов, рассчитывается в количестве электронов, из (2.8):

$$\Delta S(\nu = 0) \sim \Delta, \quad (2.11)$$

σ_E – среднее квадратичное отклонение шумовой составляющей сквозного оптико-электронного тракта, рассчитывается в количестве электронов,

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_n^2 + \sigma_{э-ц}^2}, \quad (2.12)$$

$\sigma_{э-ц}$ – величина суммарного интегрального шума электронно-цифрового тракта системы,

σ_n – отражает поведение фотосигнала с распределением Пуассона $\sigma_n = \sqrt{S}$ или с учетом (2.8):

$$\sigma_n \sim \sqrt{k \cdot \Delta} \quad (2.13)$$

где k – коэффициент пропорциональности зависимости сигнала и величины проекции пикселя.

Из (2.10-2.13) функциональная зависимость сигнально-шумовой характеристики при изменении проекции пикселя на подстилающую поверхность определяется по формуле:

$$SNR(\nu = 0) \sim \frac{k \cdot \Delta}{\sqrt{k \cdot \Delta + \sigma_{э-ц}^2}} \quad (2.14)$$

Т.е. при уменьшении проекции пикселя данная характеристика уменьшается. В условии, когда $k \cdot \Delta \gg \sigma_{э-ц}^2$, уменьшение происходит по закону: $SNR(\nu = 0) \sim \sqrt{\Delta}$. А при низких уровнях фотонного шума относительно шума электронно-цифрового тракта зависимость выражается линейным законом: $SNR(\nu = 0) \sim \Delta$.

Таким образом, из уравнений (2.9) и (2.14) видно, что при изменении проекции пикселя на подстилающую поверхность происходит одновременное разнонаправленное изменение двух основных характеристик ГСК. А, следовательно, при решении задачи проектирования оптической схемы выбор характеристик системы должен учитывать произведение этих двух характеристик (1.16). Так, на сегодняшний день, оптимальными характеристиками для решения

большинства задач распознавания обладают камеры с характеристиками, схожими с гиперспектрометром *Hiperion*, который был запущен полтора десятилетия назад.

2.2. Принцип работы многощелевой гиперспектральной камеры

При более детальном рассмотрении принципа работы «push-broom» ГСК видно, что именно в плоскости щели происходит отсекаание большого количества светового излучения, поэтому необходимо рассмотреть возможность доработки щелевой области.

На данный момент все известные образцы «push-broom» ГСК функционирующие или уже прошедшие летные испытания в космическом пространстве работали только с одной щелью. Тем не менее в работах [12], [13] исследована возможность увеличения энергетической эффективности гиперспектрального прибора за счет применения многощелевой структуры. Данный подход является усовершенствованным методом тангажного замедления, а основной принцип сводится к увеличению эффективного времени накопления. Тангажное замедление позволяет уменьшить скорость бега изображения по щелевому и фотоприемному устройству на некоторое время. Это производится за счет поворота космического аппарата вдоль пути направления движения. В некоторых случаях отслеживание изображения выполняется зеркалом, расположенным перед входным зрачком прибора.

При функционировании стандартной ГСК (с одной щелью) в режиме тангажного замедления часть подстилающей поверхности снимается с большим временем экспозиции, Рисунок 2.1а, малая область красного цвета. Но поскольку подспутниковая точка перемещается на большее расстояние, то появляется пропущенная при съемке область, обозначенная зеленым цветом. В этом случае изображение подстилающей поверхности состоит из отдельных фрагментов.

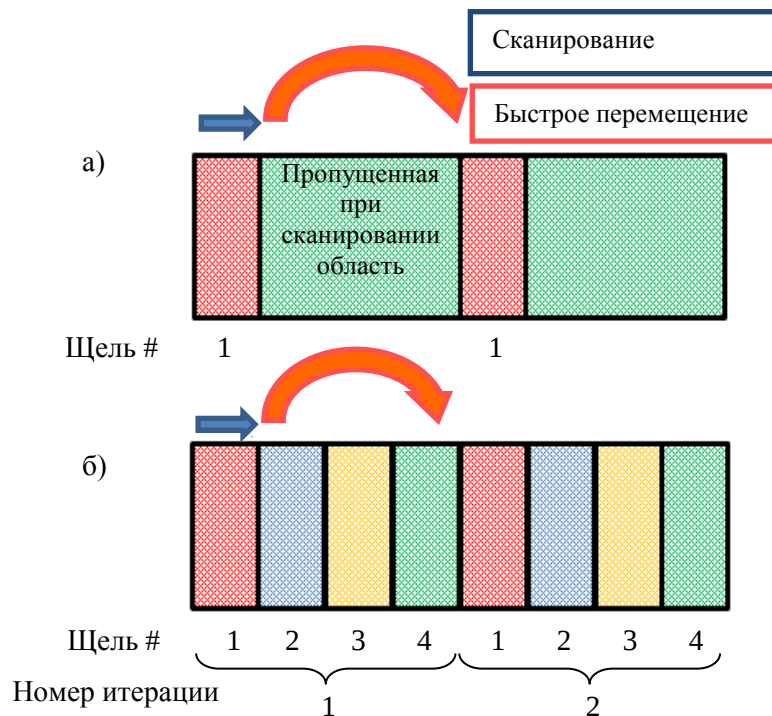


Рисунок 2.1. Маршрутная съемка (а) однощелевой ГСК в режиме отслеживания, (б) многощелевой ГСК.

При функционировании ГСК с несколькими щелями принцип съемки основан на пространственном разделении проекций щелей вдоль полета. Расстояние между щелями, периодичность и длительность одного цикла сканирования подобраны таким образом, что дополнительные щели снимают недостающие области подстилающей поверхности Рисунок 2.1б. А после составления изображений полученных от разных щелей, формируется непрерывный трек на подстилающей поверхности.

Однако, использование в предлагаемой конструкции ГСК для отслеживания изображения механического устройства (крупногабаритного поворотного зеркала) нивелирует главное технологическое преимущество ГСК, функционирующих в «push-broom» режиме, а именно отсутствие подвижных частей. Поэтому далее предлагается метод электронного управляемого отслеживания изображения в космической гиперспектральной камере.

2.3. Метод комбинированного отслеживания изображения

Суть метода комбинированного отслеживания изображения (КОИ) состоит в выборе многоцелевой схемы, а также в управляемом единым контроллером отслеживании изображения в плоскости щелевого устройства и в плоскости ФПУ. Использование такого подхода позволяет избежать трудностей, возникающих при отслеживании изображения с помощью поворотного зеркала или вращения КА, а именно:

- ограниченного ресурса работы механических подвижных элементов,
- необходимостью в дополнительном времени для возвращения КА или зеркала в первоначальное угловое положение,
- необходимостью в сшивке фрагментов изображения,
- эффект «дрожания» поворотного устройства приводит к дополнительному «смазу» в изображении,
- завышенными массогабаритными характеристиками
- при использовании поворотного зеркала гиперспектрометр обладает дополнительными оптическими искажениями, вызванными неидеальностью поверхности зеркала.

Понимание главной идеи предлагаемого метода КОИ иллюстрируется общей схемой работы ГСК (Рисунок 2.2). Фотоны от зондируемого объекта на подстилающей поверхности попадают на входной объектив (1), который проецирует изображение на микрозеркальную матрицу (МКМ) (2). Управляющий контроллер формирует структуру в виде отдельных строк, каждая из которых исполняет роль щели. **За счет управляемого перемещения щелевой структуры по МКМ происходит отслеживание изображения.** Каждая щель, формируемая на МКМ, направляет изображение соответствующего узкого участка (далее называем линейный участок) ПП последовательно в коллимационный объектив (3), диспергирующий элемент (4) и выходной объектив (5). Разложенное в спектр излучение от каждого линейного участка далее фокусируется на фотоприемную

матрицу, и формируется изображение в специальном режиме работы ФПУ (6), подробное рассмотрение которого представлено в 3 главе работы.

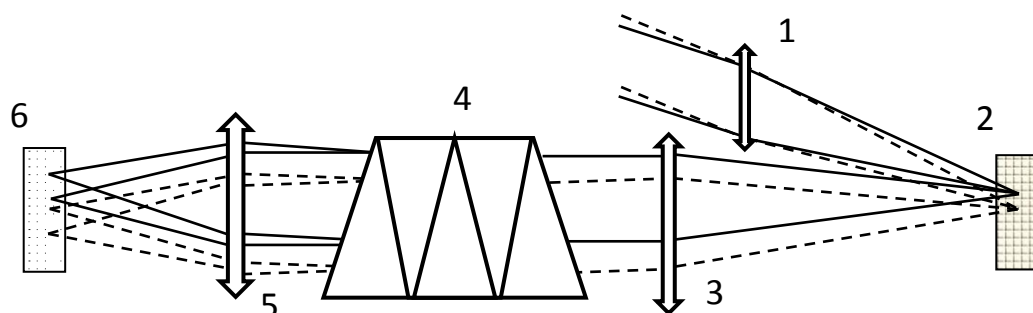


Рисунок 2.2. ГСК с КОИ содержит микрзеркальную матрицу и фотоприемное устройство, функционирующие в режимах отслеживания

Отметим, что в предложенном методе в отличие от метода с механическим отслеживанием (МО) осуществляется полная «заморозка» относительных скоростей бега изображения в щелевом устройстве и ФПУ (МО в ГСК производит только замедление скорости бега изображения). Для этого выполняется синхронное движение щелевой структуры по МКМ и движение зарядовых пакетов в ПЗС-матрице со скоростями, равными соответствующим скоростям бега изображения по плоскости МКМ и ПЗС-матрицы.

Наряду с ФПУ, критически важным и «новым», в контексте использования в космическом гиперспектрометре, является щелевой элемент конструкции ГСК с КОИ. В качестве многофункционального щелевого устройства возможно использовать или жидкокристаллический дисплей или микрзеркальную матрицу (МКМ). В работе рассматривалось использование матрицы микрозеркал в виду её более высокого энергетического коэффициента пропускания.

Использование многофункционального щелевого устройства при управляемом отслеживании изображения обладает такими дополнительными преимуществами как: переменная толщина щелей, возможность перенаправлять световой поток в другую выходную оптическую схему (панхроматическую или

мультиспектральную камеру), возможность съемки темнового кадра, возможность изменения количества щелей, и т.д.

2.4. Структурная схема алгоритма комбинированного отслеживания изображения гиперспектральной камеры

На основе предложенного метода был разработан алгоритм управления камеры, функциональная схема которого представлена на Рисунках 2.3, 2.4. Алгоритм предназначен для проведения съемки и направлен на получение конечного продукта – набора спектральных изображений подстилающей поверхности.

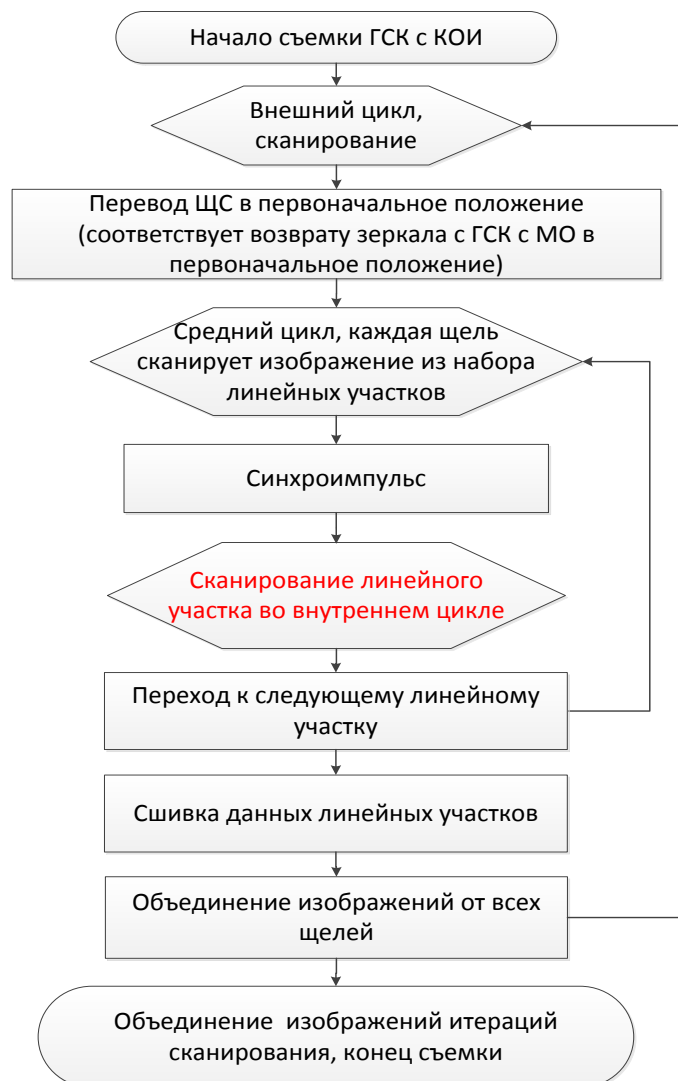


Рисунок 2.3. Функциональная схема алгоритма управления режима КОИ ГСК

Алгоритм включает в себя три вложенных цикла: внешний, средний и внутренний. Ключевую роль, являющуюся отличительной особенностью предлагаемого подхода от существующих методов формирования изображения в гиперспектрометрах, играет внутренний цикл, в котором происходит электронное отслеживание каждого линейного участка. Рассмотрим основные шаги этого цикла.

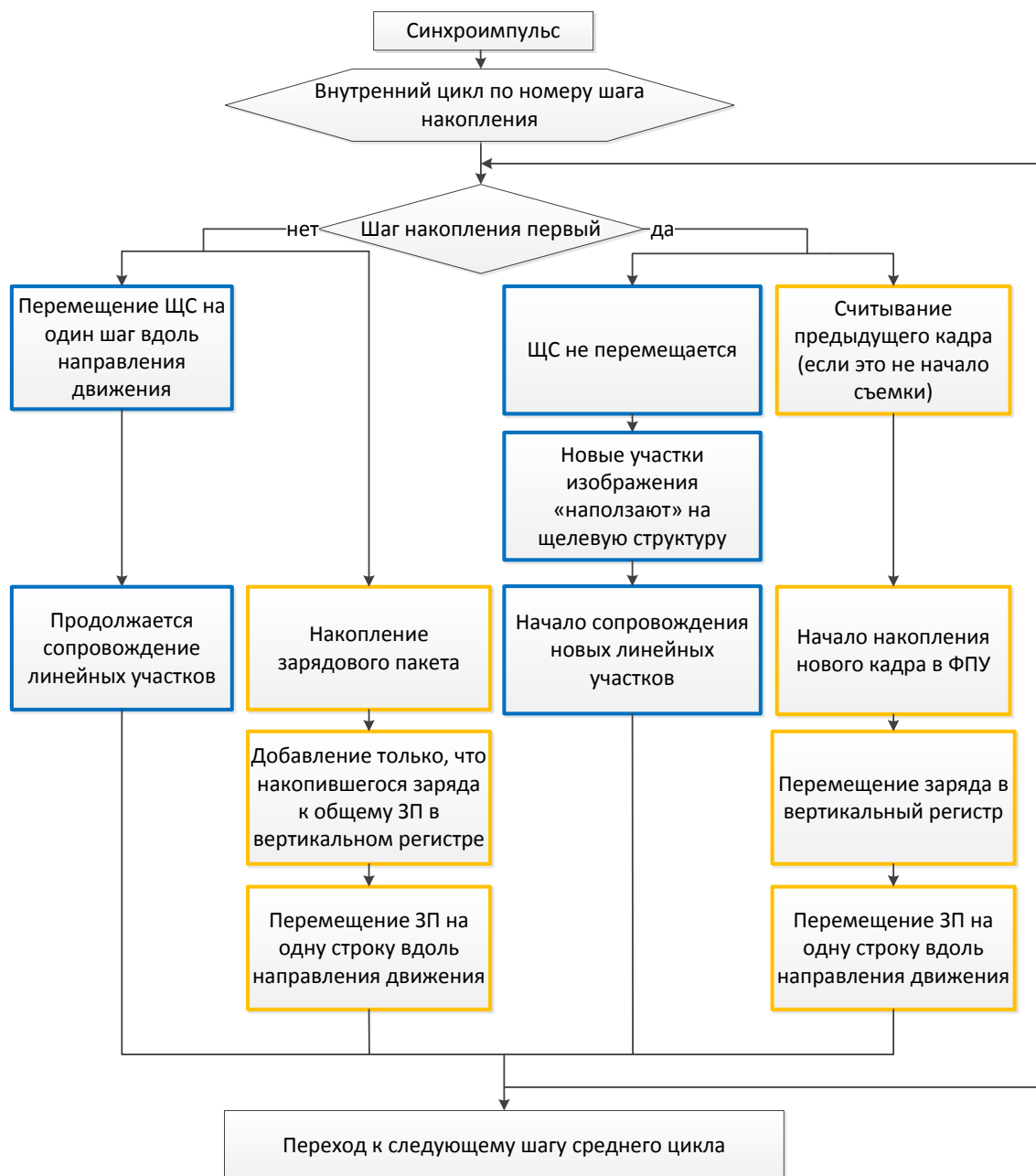


Рисунок 2.4. Функциональная схема внутреннего цикла алгоритма управления режима КОИ ГСК. Синим и желтым обозначены блоки

функционирования щелевой структуры и фотоприемного устройства соответственно.

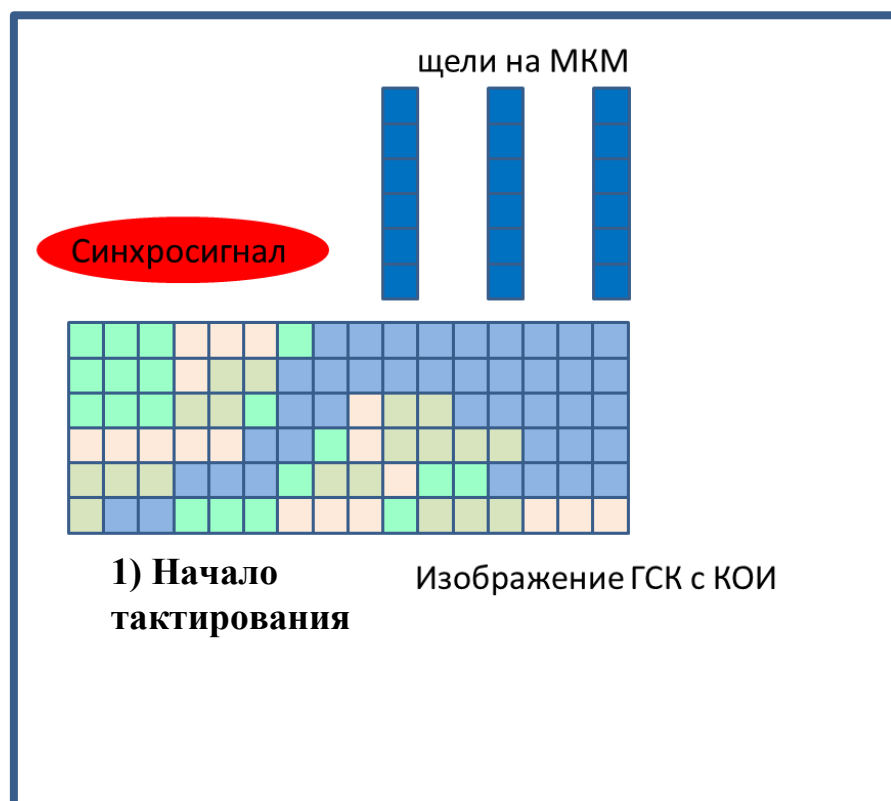
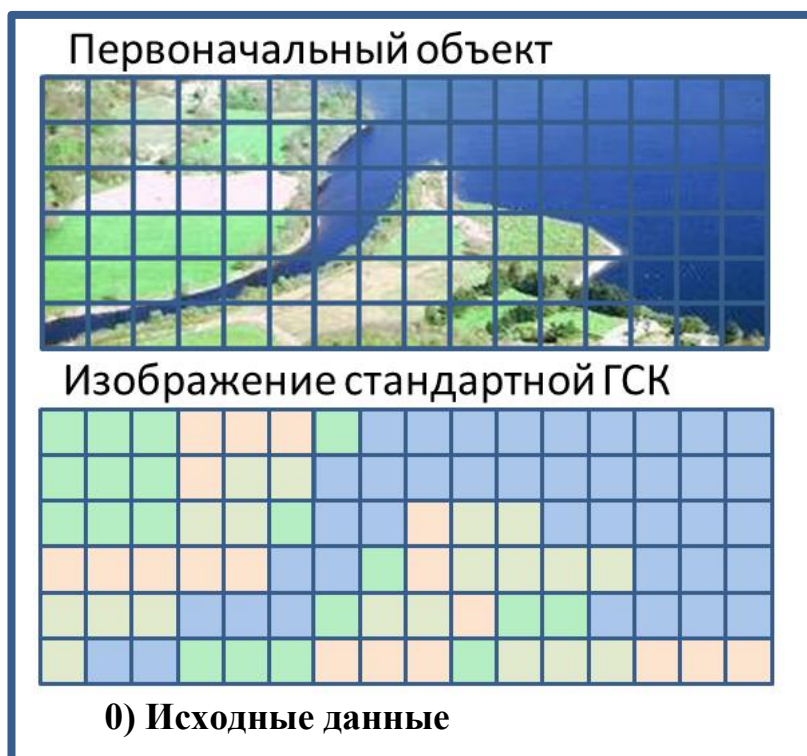
Вначале с управляющего контроллера подается импульс синхронизации одновременно на два устройства, ФПУ и МКМ. Частота следования синхроимпульсов определяется с учетом высоты орбиты космического аппарата и величины пространственного разрешения. Далее, во время первой итерации щелевая структура на МКМ остается неподвижной, а в ФПУ начинается процесс накопления сигнала. В следующей итерации осуществляется синхронное смещение щелевой структуры в МКМ и всех зарядовых пакетов в ФПУ на одну позицию. Далее в этой итерации в ФПУ происходит накопление нового сигнала и его добавление к старому. После этого цикл повторяется требуемое количество раз, а суммарное количество итераций равно количеству шагов отслеживания. В результате функционирования внутреннего цикла происходит увеличение чувствительности:

$$\frac{\eta_{N_{\text{щ}}}}{\eta_1} = \frac{K_{\text{МКМ}} \cdot N_{\text{щ}}}{K_{\text{ст.щ.}}}, \quad (2.15)$$

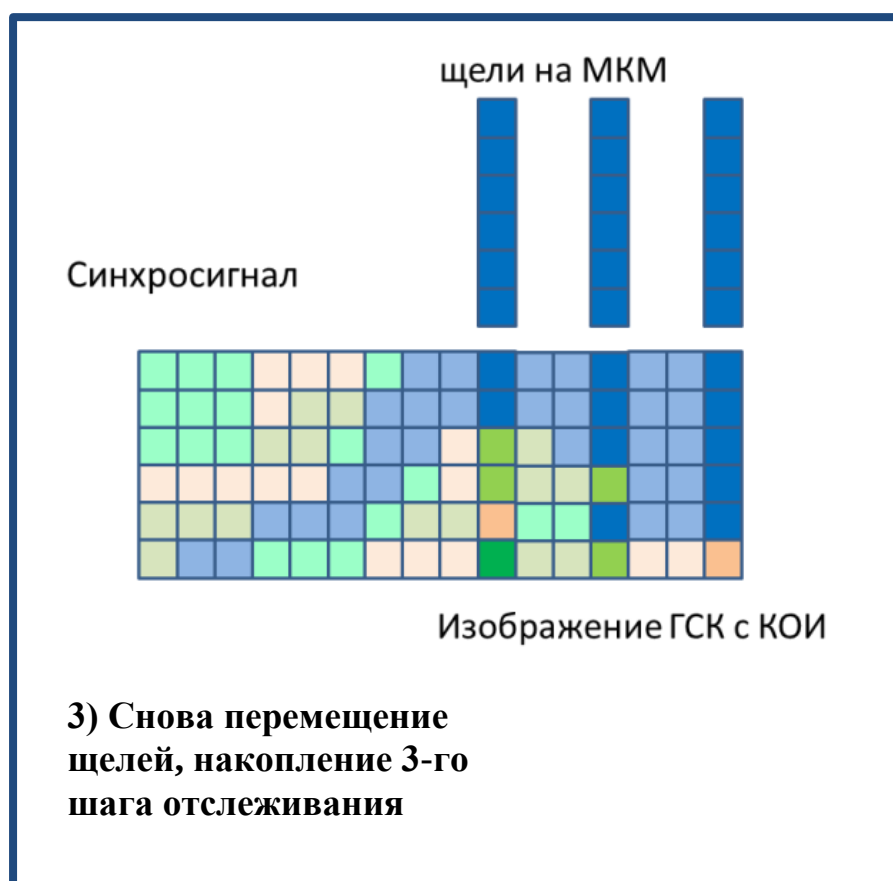
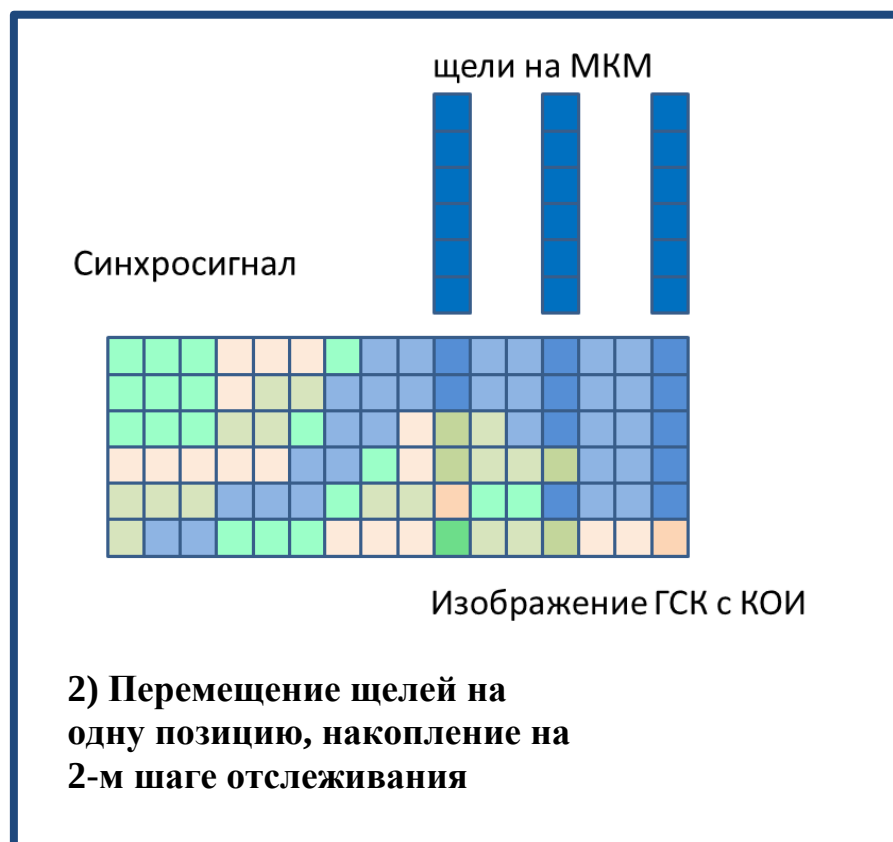
где $\eta_{N_{\text{щ}}}$, η_1 – энергетическая чувствительность соответственно ГСК, функционирующей в режиме КОИ и стандартной ГСК, $K_{\text{МКМ}}$, $K_{\text{ст.щ.}}$ – коэффициенты отражения МКМ и пропускания стандартного ЩУ, $N_{\text{щ}}$ – количество щелей.

В стандартных ГСК с “push-broom” изображение представляет собой последовательность линейных участков, расположенных друг за другом. В свою очередь, в методе КОИ процесс формирования изображения усложнился из-за перемещения щелей и зарядовых пакетов в ФПУ. Полный трек изображения формируется с включением среднего (поясняющий Рисунок 2.5) и внешнего циклов (поясняющий Рисунок 2.1).

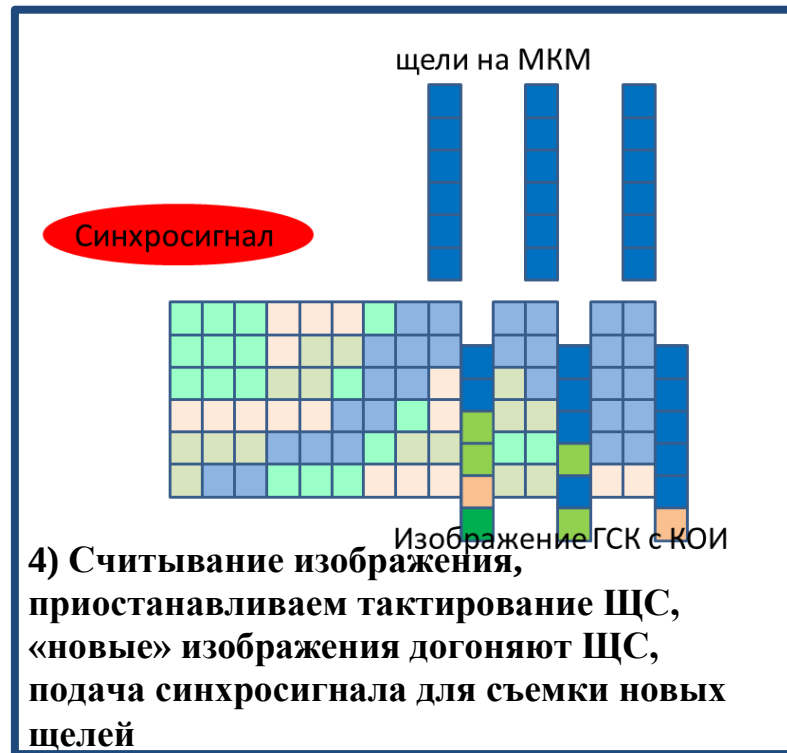
Начало рисунка 2.5.



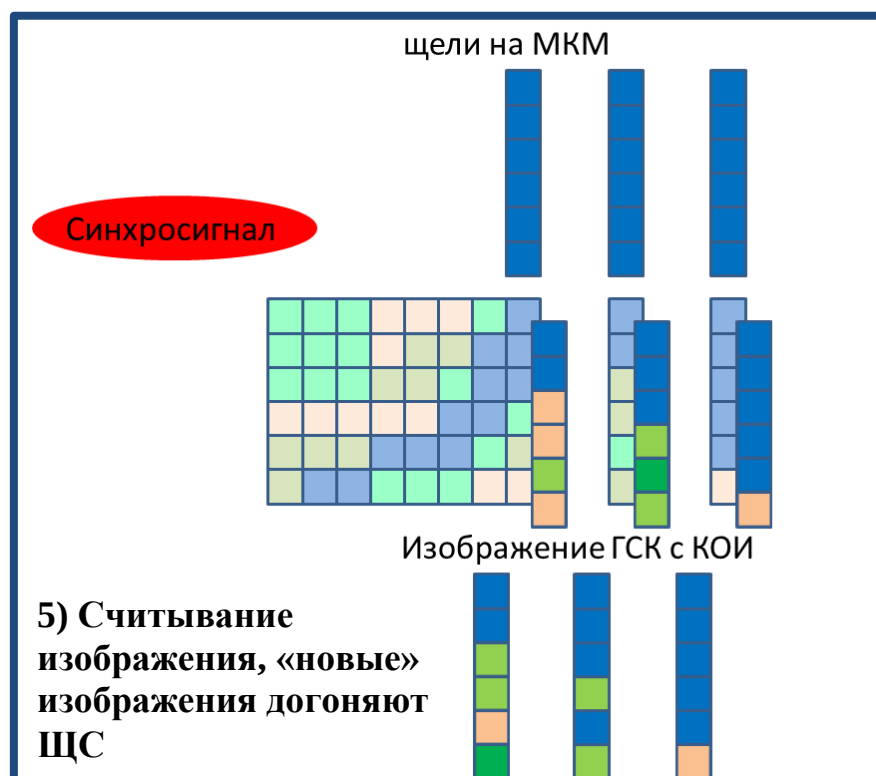
Продолжение рисунка 2.5.



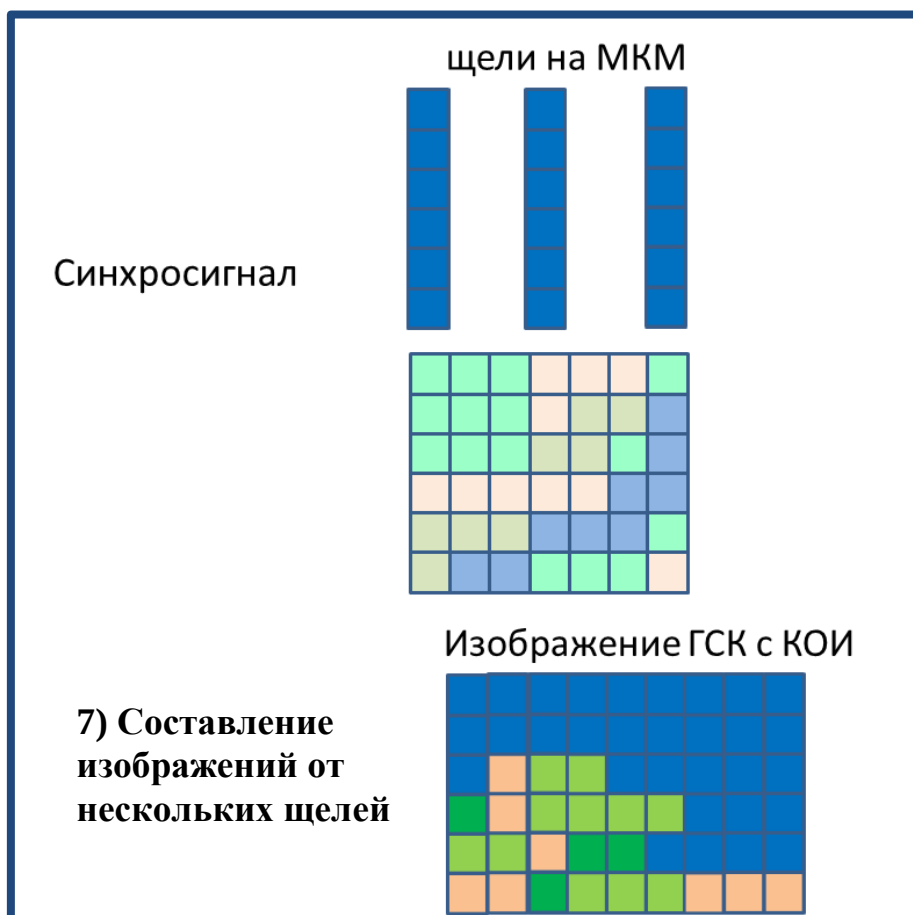
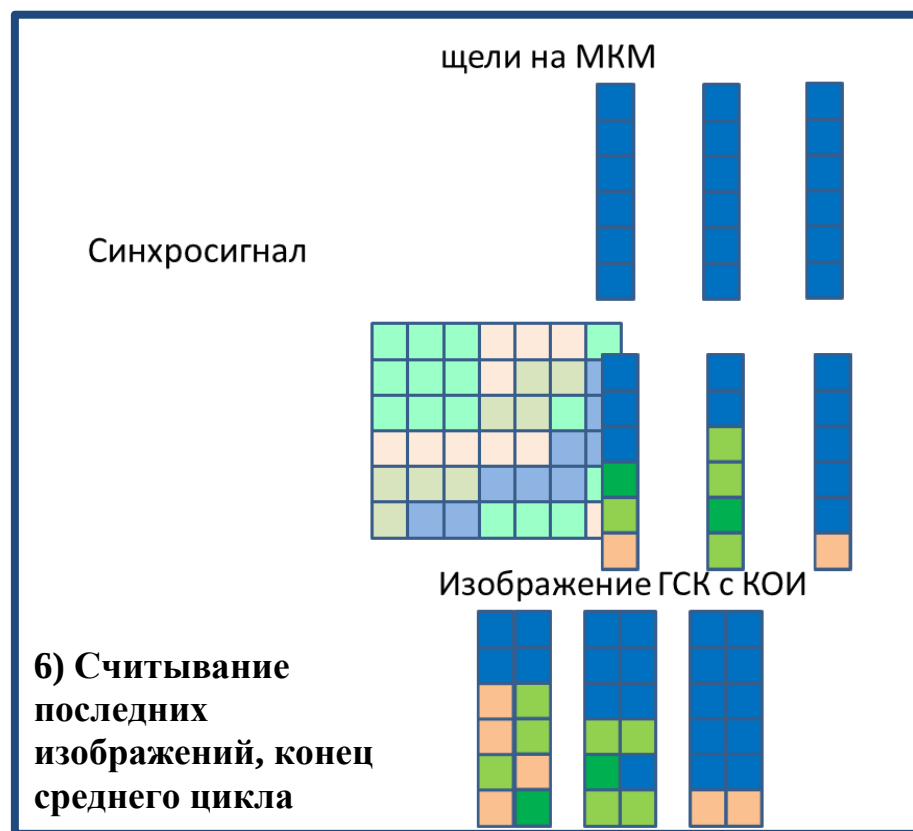
Продолжение рисунка 2.5.



Далее работа внутреннего цикла (действия 1-3) будет пропускаться. Внутренние циклы пропущены между действиями (4-5) и (5-6). Синхросигнал подается вначале каждого внутреннего цикла.



Продолжение рисунка 2.5.



Продолжение рисунка 2.5.



Рисунок 2.5. Работа среднего и внутреннего циклов для 3-х щелей и 3-х шагов отслеживания, изображения (1-3) показывают работу внутреннего цикла; изображения (1-6) демонстрируют работу среднего цикла, при этом внутренний цикл показан только один раз.

- На Рисунке 2.5 показан полный средний цикл работы камеры с КОИ. Во время среднего цикла происходит поэтапное отслеживание всё «новых» линеек на подстилающей поверхности. За счет периодической остановки щелевой структуры, «новые» объекты как бы наезжают на щелевую маску. Если для внутреннего цикла количество сохранённых спектральных кадров равно единице, то здесь каждому «новому» набору щелевых объектов соответствуют свои

спектральные кадры. Поэтому после проведения съемки всех линейных участков производится составление спектральных откликов каждого линейного участка для разных щелей.

- На Рисунке 2.1б показаны две последовательные итерации внешнего цикла работы камеры. Для многощелевой ГСК с механическим отслеживанием это соответствует двум возвратам поворотного зеркала. Только в методе КОИ «возврат» выполняется не перед зрачком прибора с помощью зеркала, а за счёт перемещения щелевой маски по направлению, откуда приходят новые изображения. Другими словами, за средние и внутренние циклы щелевая структура прошла существенное расстояние по направлению движения изображения, но в начале каждой итерации внешнего цикла щелевая структура возвращается в исходную точку отправления. После выполнения очередного этапа сканирования общий трек в изображении дополняется новыми данными.

Выводы по Главе 2

В данной главе предложен метод комбинированного отслеживания изображения, использующийся в щелевых гиперспектрометрах космического базирования и предназначенный для увеличения энергетической чувствительности или частотной сигнально-шумовой характеристики.

Предлагаемый метод основан на:

- выборе многощелевой схемы,
- отслеживании изображения в двух ключевых устройствах щелевом и фотоприемном устройстве.

Увеличение сигнала в предложенном методе КОИ происходит в аналоговом виде, то есть отслеживание объекта аналогично увеличению эффективного времени накопления. Поэтому не возникают дополнительные требования на обработку большего объема данных и больший канал передачи информации.

Принципиальное отличие данной работы от уже проведенных ранее исследований по разработке гиперспектрометров с несколькими щелями с

механическим отслеживанием [12] [13] состоит в реализации полностью электронного отслеживания. То есть такая камера не содержит в себе никаких крупногабаритных механически подвижных элементов и в ней отсутствуют дополнительные оптические искажения, связанные с поворотным зеркалом.

Глава 3 Специальный режим электронного отслеживания изображения на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы

Помимо предлагаемого изменения процесса формирования изображения многощелевым гиперспектрометром, другим важным аспектом реализации КОИ является модернизация аппаратно-программной части, а именно реализация сопровождения спектральных откликов в ФПУ. Поэтому в текущей главе описывается модель и программная реализация блока специального электронного отслеживания (ЭО) изображения на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы.

Чтобы понять, каким образом метод электронного отслеживания может быть реализован, проведем краткий анализ различных типов и архитектур построения фотоприемных устройств, а также кратко рассмотрим принципы их работы именно в контексте съемки спектральных кадров с отслеживанием.

В последние несколько десятилетий происходит активное внедрение фотоприемных устройств в различные отрасли деятельности человека. Промышленный спрос на фоточувствительные устройства подталкивает научное сообщество к непрерывному совершенствованию технологий изготовления ФПУ, а также увеличению числа различных архитектур построения фоточувствительных зон в ФПУ.

Существует два основных подхода к регистрации и передачи изображения ФПУ. Кратко коснемся устройств построенных на базе комплементарной структуре металл-оксид-полупроводник (КМОП), а далее разберем процесс формирования изображения и алгоритм работы ФПУ функционирующего на принципе зарядовой связи (ПЗС).

КМОП технологии активно применяются в фотографии, инженерном и космическом приборостроении. Основное преимущество таких ФПУ относительно ПЗС состоит в относительно недорогой стоимости изготовления, низком энергопотреблении и слабым эффектом растекания заряда. Но в

совокупности с перечисленными преимуществами, на данный момент, не существует КМОП ФПУ, которые бы успешно перемещали зарядовые пакеты по плоскости матрицы. Поэтому для реализации специального режима электронного отслеживания более подходящими являются фотоприёмные устройства, работающие по принципу зарядовой связи.

3.1. ПЗС фотоприемные устройства

ПЗС относятся к устройствам функциональной электроники [64] [65], то есть такие ФПУ, в отличие от КМОП, нельзя представить в виде набора транзисторов и конденсаторов. А сам принцип ПЗС основан на передачи зарядовых пакетов от многих пикселей с использованием всего нескольких управляющих тактовых фаз.

ПЗС фотоприёмные устройства обладают высокой квантовой эффективностью в широком спектральном диапазоне спектра, малыми уровнями собственных шумов и большим динамическим диапазоном, в связи с этим такие устройства нашли широкое применение в любительской и профессиональной фотосъемке. ПЗС ФПУ также используются при решении научно-технических задач [66], так для регистрации однофотонного излучения применяются специальные ICCD (Intesifire) строчно-кадровые ПЗС-матрицы [67].

3.1.1. Процесс детектирования фотозаряда в пикселе ПЗС ФПУ

Упрощенно ПЗС-матрицу можно рассматривать как массив близко расположенных конденсаторов металл-диэлектрик-полупроводник. А сигнал представлен в виде зарядового пакета, располагающегося на конденсаторе. На Рисунке 3.1 представлена элементарная фоточувствительная ячейка ФПУ со скрытым каналом хранения и передачи.

Пусть полупроводник, в котором происходит накопление зарядового пакета, обладает проводимостью р-типа, то есть основными носителями заряда являются дырки. После подачи на электрод положительного потенциала в зоне р-

полупроводника возникает обедненная область. В случае возникновения свободной электронно-дырочной пары (например, вследствие процесса облучения), подвижные дырки уйдут вглубь полупроводника на расстояние десятка микрометров, а сгенерированные фотоэлектроны напротив будут собираться внутри скрытого канала n^+ (размер 0.3-0.5 мкм) [68] [69].

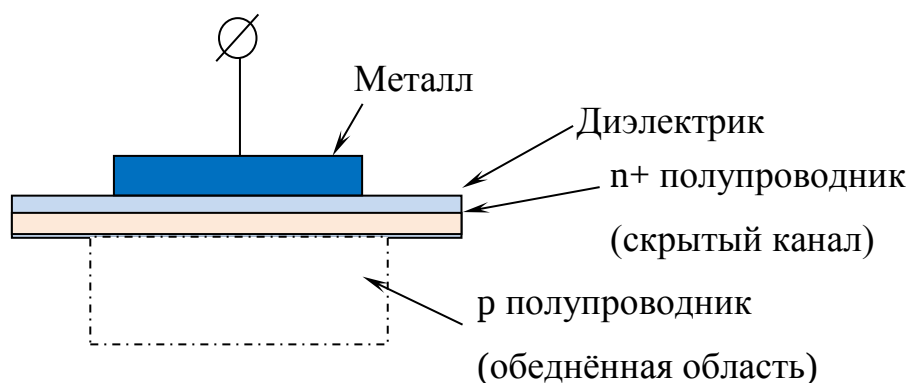


Рисунок 3.1. Структурная схема элементарной фоточувствительной составляющей пикселя ФПУ со скрытым каналом хранения и передачи

3.1.2. Архитектуры различных ПЗС ФПУ

В различных сферах используются ПЗС ФПУ с разной архитектурой построения. Рассмотрим более подробно основные типы построения матричной фоточувствительной зоны, а также проведем выбор архитектуры построения ФПУ для последующей реализации на ней специального режима электронного отслеживания изображения вовлеченного в метод КОИ ГСК.

Так как для гиперспектральной съемки методом «push-broom» выходная информация ФПУ должна быть представлена в виде последовательности спектральных кадров (пункт 1.1.2), ограничим рассмотрение только кадровыми устройствами.

Исторически, первыми были разработаны **ПЗС-матрицы с кадровым переносом (КП) заряда**. Такой фотоприемник можно разделить на несколько составляющих: секция хранения, секция накопления заряда и горизонтальный выходной регистр, Рисунок 3.2.

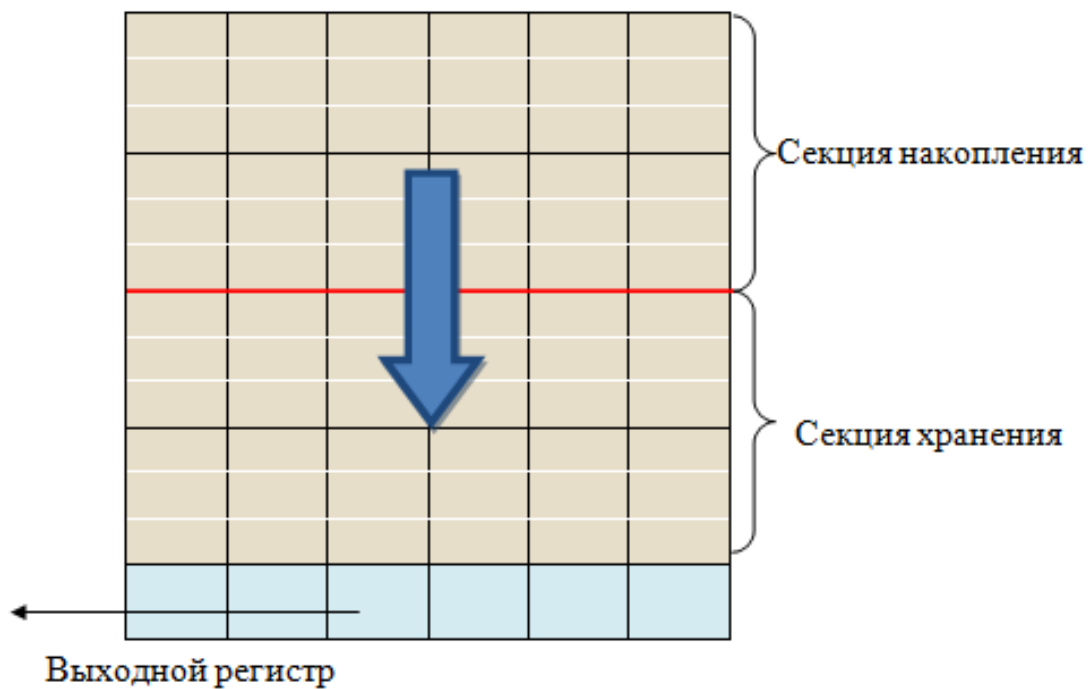


Рисунок 3.2. Матричная ПЗС-матрица с кадровым переносом

Секция накопления состоит из столбцов пикселей, отделенных друг от друга стоп каналами. В зоне накопления происходит регистрация светового излучения, с последующей передачей зарядовых пакетов в секцию хранения. То есть данные столбцы одновременно являются и фоточувствительными элементами, и вертикальными регистрами, в которых происходит перемещение зарядовых пакетов.

Во время регистрации сигнала в зоне накопления, из зоны хранения через горизонтальный регистр происходит считывание предыдущего кадра. Горизонтальный регистр располагается непосредственно под секцией хранения, а число ячеек в нём равно числу столбцов в секциях накопления и хранения. Область хранения заряда, выходной регистр и выходное устройство экранируется от воздействия света напылением алюминиевого покрытия на поверхность кристалла.

В момент начала процесса накопления на электроды секции накопления подается напряжение, создающее области обедненного заряда в каждом пикселе. Сразу после окончания времени накопления на фазные электроды подаются

соответствующие импульсы переноса, и набор зарядовых пакетов параллельно сдвигается в секцию хранения. После окончания переноса процесс накопления заряда возобновляется, а из секции хранения происходит построчное считывание пакетов.

К достоинствам таких ФПУ можно отнести возможность реализации освещения со стороны подложки (при обратной засветке квантовая эффективность выше) и эффективное использование светочувствительной области.

Но при всей простоте матриц с КП, у таких ФПУ есть один значительный недостаток, а именно сам принцип кадрового переноса. Обычно максимальная частота переноса заряда таких ФПУ составляет десятки МГц, а количество строк достигает нескольких тысяч. Поэтому интегральное время переноса всего кадра в зону хранения из зоны накопления достигает сотни микросекунд. За такое время в матрицах с КП к полезному сигналу добавляется сигнал смазанного изображения, что негативно влияет на итоговое качество съемки.

Поэтому позднее для устранения влияния смаза были разработаны специальные механические затворы, синхронизованные с работой основной части ФПУ. В такой системе достаточно использовать только одну секцию, в которой происходит накопление заряда, такие устройства носят название односекционные ФПУ с кадровым переносом.

Для решения ряда задач ДЗЗ в оптико-электронных системах активно используют **ПЗС-матрицы с временной задержкой и накоплением (ВЗН)** [70] [71] [72]. Принцип временной задержки и накопления позволяет значительно увеличить светосигнальную характеристику прибора по сравнению с другими архитектурами ФПУ без ухудшения пространственного разрешения.

Принцип работы режима ВЗН основан на отслеживании изображения и увеличении эффективного времени накопления при съемке объекта. При движении объекта индуцируемый зарядовый пакет перемещается синхронно с

изображением объекта. В каждой следующей строке к имеющемуся зарядовому пакету добавляется дополнительный индуцируемый заряд, что приводит к увеличению эффективного времени накопления.

Организация таких матриц тождественна односекционным ПЗС с кадровым переносом, но отличается тактовой диаграммой управления переносом заряда. Каждый зарядовый пакет формируется не отдельным пикселем, а целым столбцом фоточувствительных элементов. Что влечет за собой значительное увеличение чувствительности по сравнению с другими ФПУ. Число строк, а, следовательно, число шагов накопления в таких приборах достигает нескольких сотен. Так на Рисунке 3.3 показана ВЗН ПЗС-матрица и процесс переноса и накопления зарядового пакета.

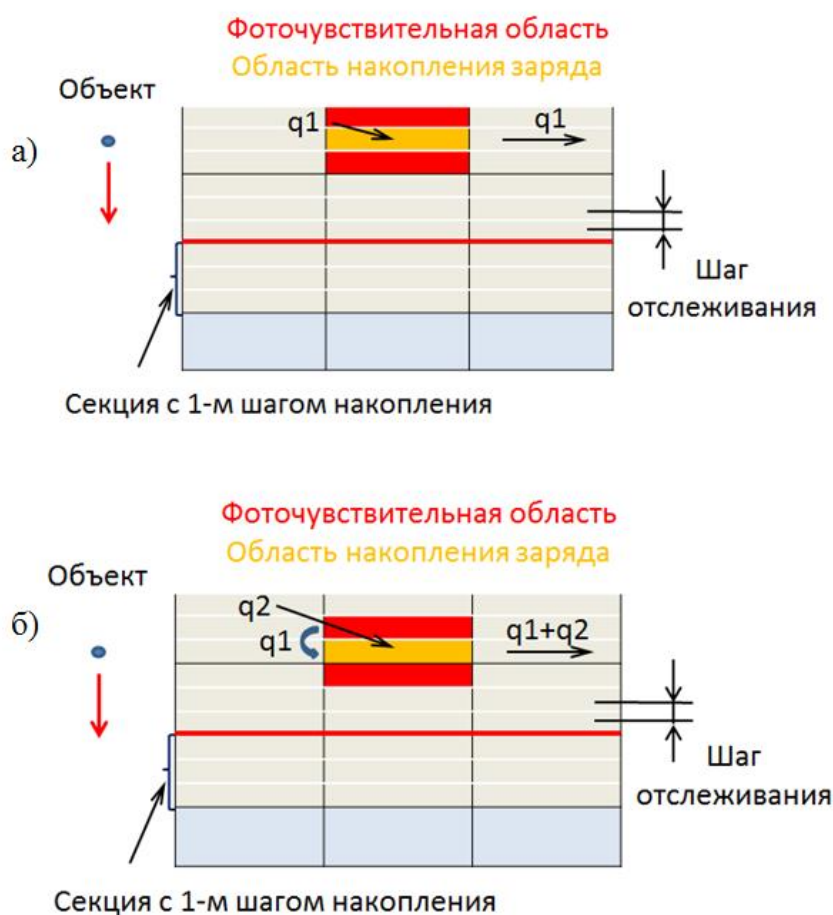


Рисунок 3.3. ВЗН ПЗС-матрица, а) положение объекта в начальный момент времени, б) положение объекта через тактовое время пролета изображения

Режим ВЗН ФПУ является предшественником разрабатываемого специального режима электронного отслеживания, но при архитектуре ВЗН ФПУ выходная информация представлена в виде последовательности линеек, что делает невозможным использование такой архитектуры в щелевых гиперспектральных системах, где требуется одномоментного съемка спектрального кадра. Поэтому далее рассмотрим на предмет возможности реализации электронного отслеживания для ГСК другой тип **строчно-кадровые матрицы**, в которых буферизация заряда происходит в вертикальных регистрах.

Особенность заключается в том, что буфер в них располагается не единым блоком под фоточувствительной зоной как у ПЗС с кадровым переносом, а находится между столбцами основной зоны.

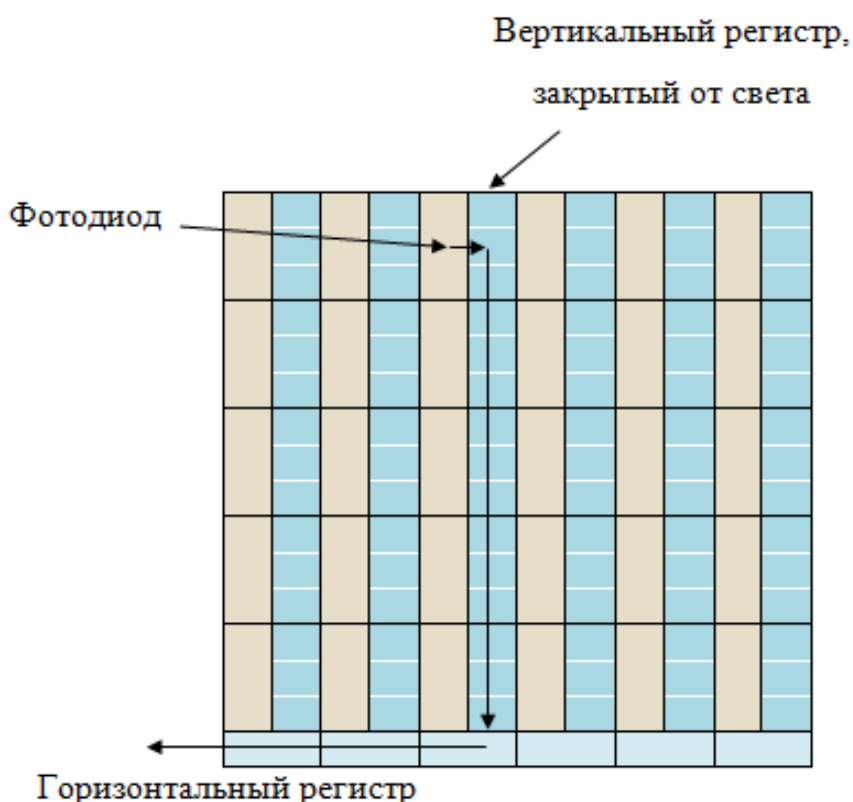


Рисунок 3.4. Строчно-кадровая ПЗС-матрица

Из-за того, что вертикальные регистры закрыты от света, ФПУ обладает относительно небольшой квантовой эффективностью. Для повышения эффективности сбора, используется массив микролинз. Данные линзы

располагаются непосредственно над кристаллом и собирают падающий свет в светочувствительную область пикселя, Рисунок 3.5. Набор линз формируется путем нанесения на поверхность пластины легкоплавкой пластмассы, которая с помощью фотолитографии разрезается на отдельные квадраты. В дальнейшем с повышением температуры края квадратов расплавляются, и в итоге каждый элемент обладает свойствами положительной линзы. Использование микролинз в таких матрицах позволяет значительно повысить чувствительность прибора.

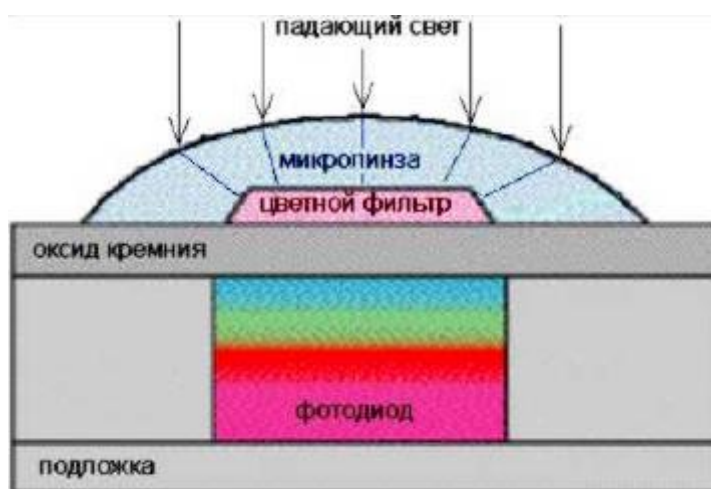


Рисунок 3.5. За счет использования микролинз происходит увеличение площади сбора падающего света в фоточувствительную область пикселя.

Таким образом, строчно-кадровые ПЗС-матрицы обладают приемлемыми значениями квантовой эффективности, низкими значениями собственного шума, низкими геометрическими шумами, а также кадровым типом выходной информации. Также в строчно-кадровой организации процесс считывания сигнала происходит в специально предназначенном вертикальном регистре, за счет этого такие ПЗС ФПУ обладают универсальностью переноса зарядовых пакетов по плоскости матрицы, этот факт предлагается использовать при реализации режима электронного отслеживания.

3.2. Специальный режим электронного отслеживания (ЭО) изображения на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы

В основе разработки режима электронного отслеживания изображения лежит использование строчно-кадровой ПЗС-матрицы, стандартный режим у которой кадровая съемка. При этом предлагается использовать важную технологическую особенность таких устройств: буферизацию зарядовых пакетов в вертикальном регистре. Далее показана реализация специального режима ЭО на выбранной строчно-кадровой ПЗС-матрице, и проведено исследование основных характеристик режима на экспериментальном образце.

3.2.1. Алгоритм управления специального режима ЭО в строчно-кадровой ПЗС-матрице

Принцип специального режима ЭО состоит в синхронизации движения зарядовых пакетов в вертикальном регистре и скорости бега изображения по матрице [73]. В отличие от стандартного режима отслеживания (на базе ВЗН ПЗС-матриц) где фоточувствительная область и область переноса заряда совпадают, в предлагаемой реализации накопление заряда производится в фотодиодах, а зарядовые пакеты перемещаются в защищенных от света вертикальных регистрах.

Функционирование ФПУ состоит из двух основных стадий: накопления и считывания. Вначале разберём процесс накопления сигнала. Рассмотрим элемент изображения, проецирующийся на первую строку матрицы. За время, равное времени перемещения изображения на один шаг отслеживания, произойдёт накопление сигнала от объекта – q_1 (Рисунок 3.6). Сразу после окончания времени экспозиции, напряжения на фазах изменяется так, что заряд q_1 в потенциальной яме каждого пиксела последовательно перемещается под фазу вертикального регистра и на соседнюю снизу строку. В течение следующего шага накопления от выбранного элемента изображения формируется сигнал – q_2 , который добавляется к первоначальному сигналу. Таким образом, сигнальный

заряд увеличился вдвое, а при использовании большего числа строк сигнальный заряд возрастает в пропорциональное количество раз.

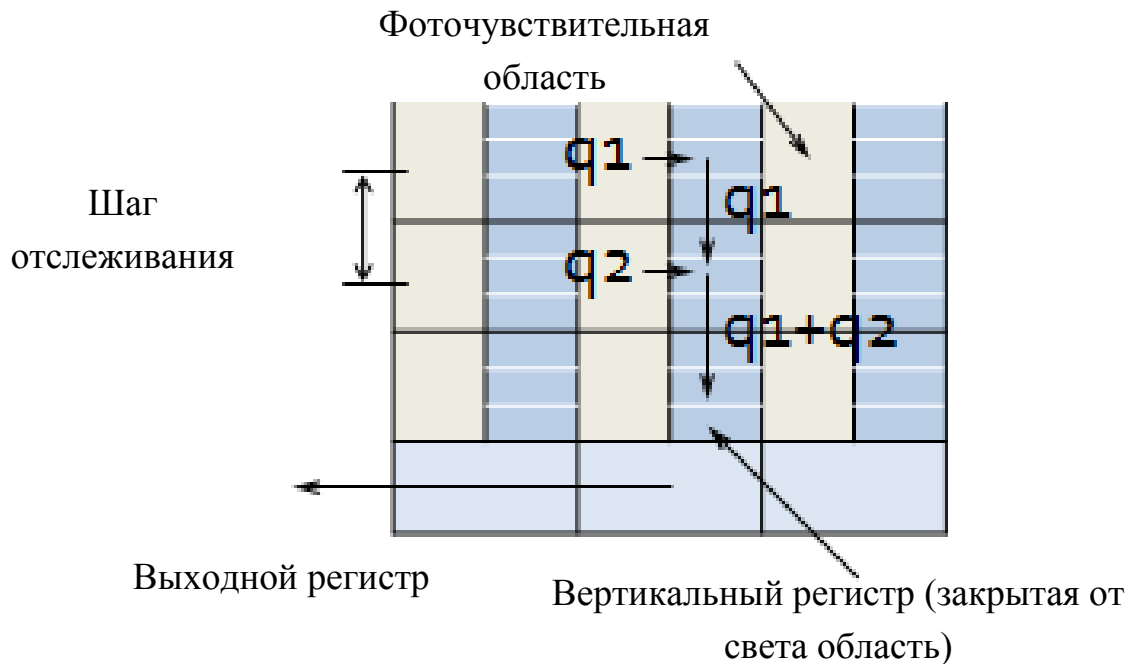


Рисунок 3.6. Процесс накопления заряда строчно-кадровой ПЗС-матрицы, работающей в режиме ЭО

Другой особенностью режима ЭО является возможность уменьшения величины «смаза» изображения за время пролета. Схематично это работает, следующим образом: увеличивается в определенное число раз количество шагов отслеживания и в то же количество раз уменьшается время накопления на каждом шаге, при этом величина сигнала остается прежней, а время на «смаз» уменьшается. Также ясно, что это работает в случае высокой стабильности движения аппаратуры и высокой точности знания скорости бега изображения по ФПУ, в противном случае качество ухудшится из-за рассогласования скоростей. Тем не менее, такая опция реализована в режиме ЭО ФПУ за счет введения дополнительного импульса сброса заряда в подложку на каждом шаге отслеживания (пояснение приведено в пункте 3.3.3 ФПМ звена «смаза» изображения).

Также отметим, что на этапе накопления сигнала зарядовые пакеты могут перемещаться как вниз, так и вверх по вертикальному регистру. Поэтому строчно-кадровая реализация режима ЭО опционально позволяет отслеживать изображение в двух направлениях. В стандартных ВЗН ПЗС-матрицах режим реверсивного перетекания зарядов так же возможен [72], но для реализации “реверса” необходимо значительно усложнить внутреннее устройство фотоприёмника в части реализации большего количества секций и выходных регистров.

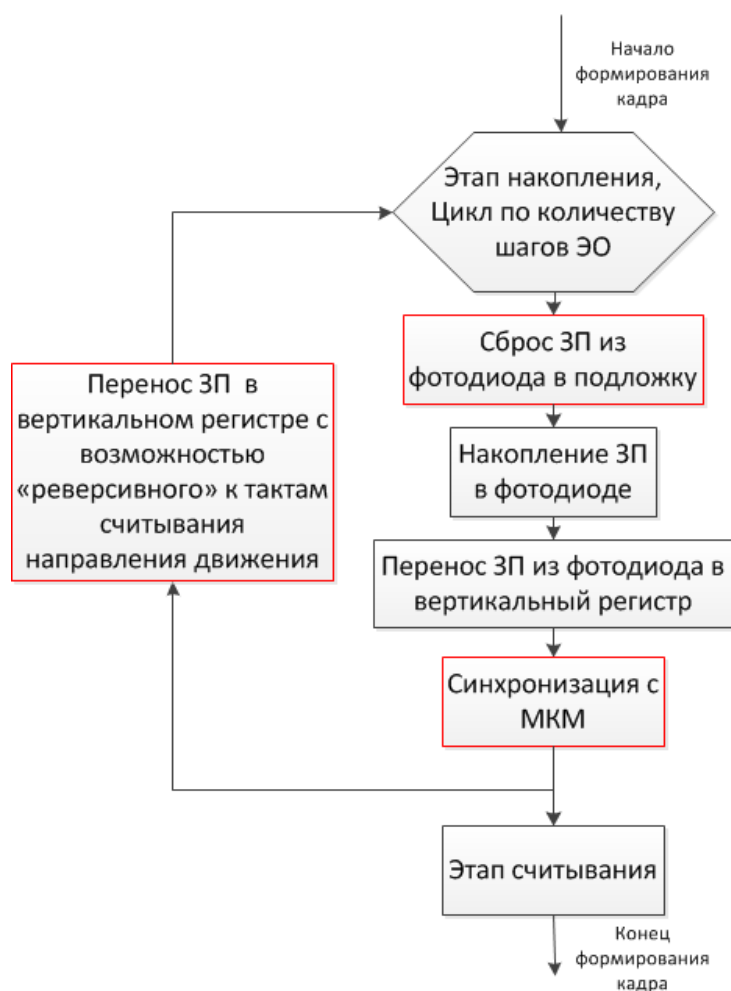


Рисунок 3.7. Функциональная схема алгоритма управления режимом электронного отслеживания строчно-кадровой ПЗС-матрицы

На Рисунке 3.7 красным выделены блоки, которые были введены или существенно изменены в данной работе. За счет введенных блоков ГСК обладает дополнительной вариативностью в части выбора произвольного времени

накопления (за счет сброса зарядового пакета из фотодиода в подложку), возможности реверсивного перетекания зарядовых пакетов, а также возможности синхронизированной работы с МКМ.

Стоит отметить, что перемещение зарядового пакета внутри ПЗС-матрицы происходит с небольшими потерями, при этом каждый такой перенос обладает своей эффективностью. Доля перемещенного заряда от накопившегося является показателем эффективности переноса. Для современных систем управления зарядовыми пакетами в ПЗС ФПУ и значение этого коэффициента составляет 0,999999 для одного переноса. Такое значение не является критическим, но в виду использования ПЗС-матрицы в нестандартном режиме работы обязательной является проверка на «утечку» части зарядового пакета, которая будет проведена позже.

3.2.2. Эффективный размер кадра в специальном режиме ЭО строчно-кадровой ПЗС-матрицы

На Рисунке 3.8 представлен процесс считывания изображения строчно-кадровой ПЗС-матрицы, где количество шагов отслеживания равно $N_{эо} = 3$.

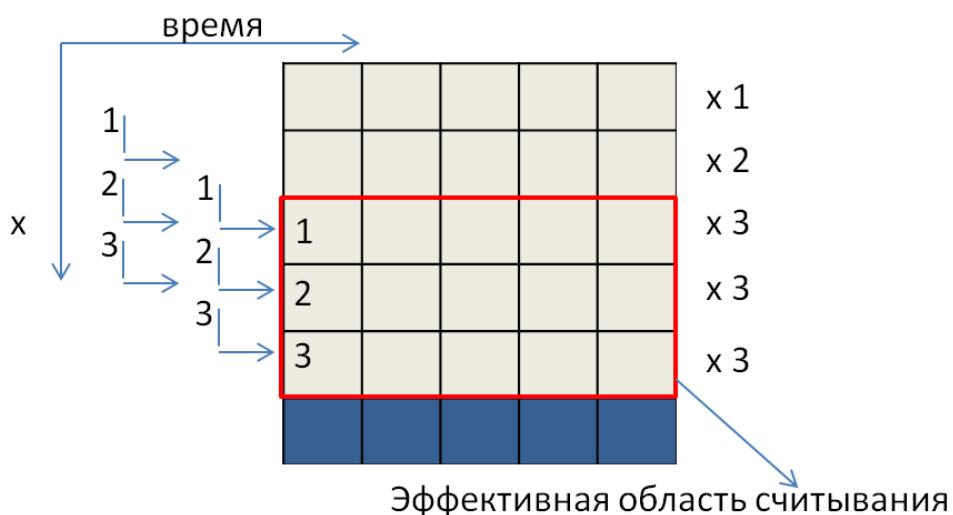


Рисунок 3.8. Процесс считывания строчно-кадровой ПЗС-матрицы работающей в режиме ЭО для $N_{эо} = 3$

После операции накопления происходит процесс считывания кадра. Пусть перемещение зарядовых пакетов происходит вниз с количеством шагов отслеживания N_{30} , Рисунок 3.8. В этом случае в верхних $N_{30}-1$ строках осуществляется накопление только части требуемого сигнала, а, следовательно, указанные стоки не участвуют в формировании итогового изображения. Количество «потерянных» строк значительно меньше общего количества строк стандартного широкоформатного строчно-кадрового ФПУ, что составляет около 1-2 %.

3.3. Экспериментальное изучение энергетических и частотных характеристик реализованного специального режима ЭО строчно-кадровых ПЗС ФПУ

В качестве экспериментального образца выступала строчно-кадровая ПЗС-матрица фирмы **Kodak KAI-08050** [74], основные параметры которой приведены в Таблице 3.1. В данном пункте работы была проведена экспериментальная проверка работоспособности реализованного режима ЭО. А именно: было проведено измерение зависимости чувствительности режима ЭО от числа шагов накопления, величины максимальной зарядовой ёмкости, уровня собственных шумов и основных частотно-передаточных характеристик режима ЭО.

Таблица 3.1. Основные характеристики исследуемой строчно-кадровой ПЗС-матрицы **KAI-08050**

Параметр	Значение
Архитектура	Строчно-кадровая ПЗС
Количество эффективных пикселей	3320 x 2472
Размер пикселя [мкм]	5.5 x 5.5
Размер изображения [мм]	18.13 x 13.6
Количество выходных устройств	1, 2 или 4
Зарядовая ёмкость фотодиода [e]	20000
Зарядовая ёмкость вертикального регистра [e]	45000
Шум считывания [e] (f=40 MHz)	12

Темновой ток [e/s] фотодиод вертикальный регистр	7 140
Максимальная частота выходного регистра [MHz]	40

3.3.1. Нормированная чувствительность специального режима ЭО

Режим ЭО предназначен для увеличения чувствительности прибора. При увеличении количества задействованных шагов накопления происходит пропорциональное увеличение чувствительности ФПУ. Подтверждение этого свойства является неотъемлемым этапом экспериментальной проверки, для которой был скомплексирован стенд для измерения (Рисунок 3.9). В качестве источника равномерного по времени и пространству излучения выступает фотометрический шар. Исследуемая камера расположена непосредственно рядом с выходным зрачком шара.

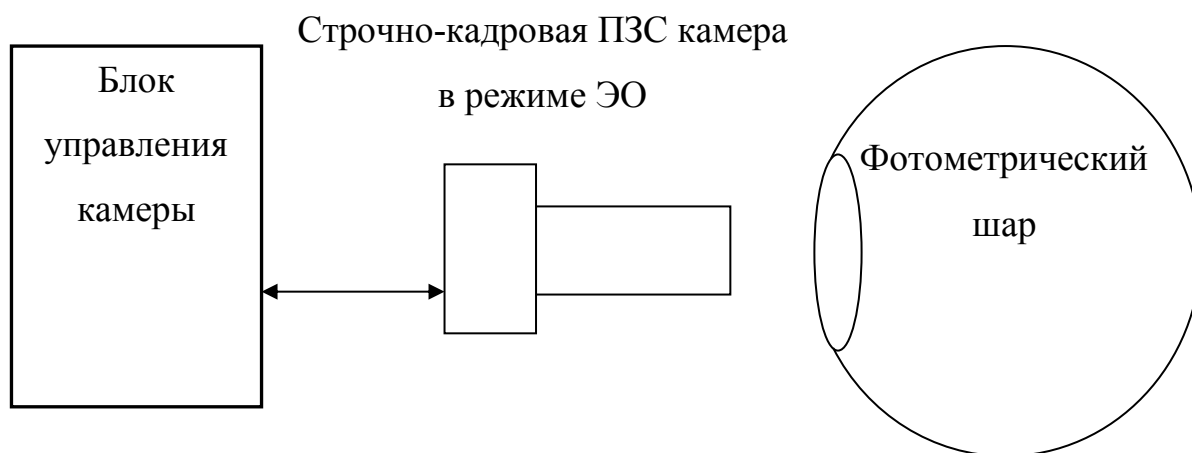


Рисунок 3.9. Стенд для измерения чувствительности камеры и энергетических характеристик

Количество шагов накопления изменялось от 1 до 128 с шагом 1. Ввиду того, что динамический диапазон ямы ограничен, для определённых значений шагов накопления производилась корректировка времени экспозиции, красные точки на Рисунке 3.10.

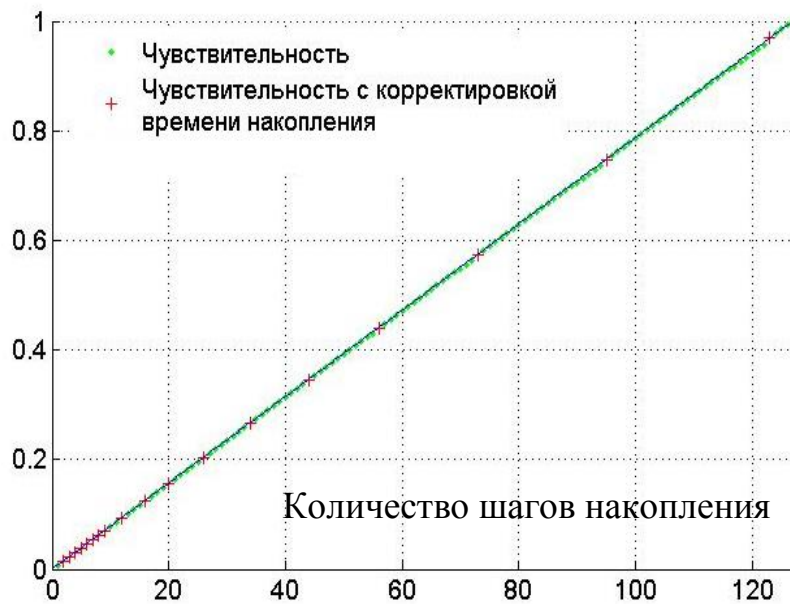


Рисунок 3.10. Зависимость относительной чувствительности прибора от количества шагов накопления

Значение сигнала при измерениях составляло от 0,5 до 0,8 от уровня насыщения, что обеспечивало высокую точность определения чувствительности (для одного пикселя $SNR > 100$). Измерялась общая чувствительность для группы пикселей (10x10 пикселей).

Отклонение чувствительности от линейной аппроксимации с началом в точке (0,0) составило не более 0,4%. Линейная зависимость демонстрирует корректность реализации режима ЭО в части отсутствия ощутимых потерь заряда при отслеживании.

3.3.2. Измерение величины максимальной зарядовой ёмкости и собственных шумов в кадровом режиме и в специальном режиме ЭО

Важной тактико-технической характеристикой ФПУ является максимальная зарядовая ёмкость единичного элемента. Максимальная зарядовая ёмкость ограничивает потенциально достижимое разрешение прибора и определяет предельное значение сигнала, который может регистрировать камера.

Выходная информация камеры после оцифровки представляется в виде уровней аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Пусть K – коэффициент

пропорциональности между значением сигнала, выраженным в электронах - E_{e-} и значением сигнала в уровнях АЦП - $E_{aцп}$, то есть:

$$K = \frac{E_{aцп} - E_{yч}}{E_{e-}}, \quad (3.1)$$

где $E_{yч}$ – уровень чёрного, выраженный в уровнях АЦП.

Известно [39], что случайный процесс, проходящий в ограниченном пространстве и в ограниченном интервале времени, описывается пуассоновским законом распределения. Ввиду этого обстоятельства считают, что информационные электроны, являющиеся результатом случайного взаимодействия стохастического во времени и в пространстве потока квантов света с кристаллической решеткой матриц ПЗС, распределены также по этому закону. Для Пуассоновского распределения имеем:

$$E_{e-} = D_{e-}^{\phi}, \quad (3.2)$$

где D_{e-}^{ϕ} – дисперсия фотонного сигнала, выраженного в электронах.

Общая величина дисперсии есть сумма отдельных составляющих, а именно:

$$D_{e-}^{\Sigma} = D_{e-}^{\phi} + D_{e-}^c, \quad (3.3)$$

где D_{e-}^{Σ} – дисперсия суммарного шума, обусловленная пуассоновским и собственным шумами, выраженная в эквивалентных электронах;

D_{e-}^c – дисперсия собственного шума, выраженная в электронах.

Известно, что если K – коэффициент пропорциональности между математическими ожиданиями случайных величин, то K^2 – коэффициент пропорциональности дисперсий этих случайных величин.

$$K^2 = \frac{D_{aцп}}{D_{e-}^{\Sigma}} \quad (3.4)$$

Из (3.1-3.4):

$$K = \frac{D_{aцп}(\mathcal{E}^1) - D_{aцп}(\mathcal{E}^2)}{E_{aцп}(\mathcal{E}^1) - E_{aцп}(\mathcal{E}^2)}, \quad (3.5)$$

где Θ^1 и Θ^2 – различные величины времени экспозиции.

Учитывая, что для нулевой экспозиции $E_{aпп}(\Theta=0) = E_{yч}$, уровень собственных шумов будет определяться в соответствии с выражением:

$$\sqrt{D_{e-}^c} = \sqrt{\frac{D_{aпп}^{\Sigma}(\Theta=0)}{K^2}} \quad (3.6)$$

Таким образом, непосредственные измерения статистик выходного сигнала АЦП при принятых допущениях позволяют оценить коэффициент преобразования K и уровень собственных шумов D_{e-}^c .

Эксперимент основан на наборе статистического материала путем анализа большого количества измерений сигнала одного фотоэлемента с усреднением величин по большому числу равномерно освещённых элементов фотоприемника.

Установка для измерения основных сигнально-шумовых характеристик идентична описанной в пункте 3.3.1 и изображена на Рисунке 3.9.

В кадровом режиме

На Рисунке 3.11 представлена зависимость математического ожидания сигнала $E_{aпп}(\Theta)$ и величины дисперсии $D_{aпп}(\Theta)$ при работе камеры в кадровом режиме.

Одной из важных характеристик ФПУ является уровень черного. Эта величина соответствует значению сигнала при времени накопления равном нулю. Ввиду того, что нулевое время накопления установить нельзя, проведем аппроксимацию зависимости среднего сигнала от времени накопления в точку с нулевым временем накопления. Полученная величина сигнала и будет уровнем черного. В свою очередь, аппроксимация графика зависимости дисперсии в точку с нулевым временем накопления определяет собственный шум фотоприемника, выраженный в единицах АЦП.

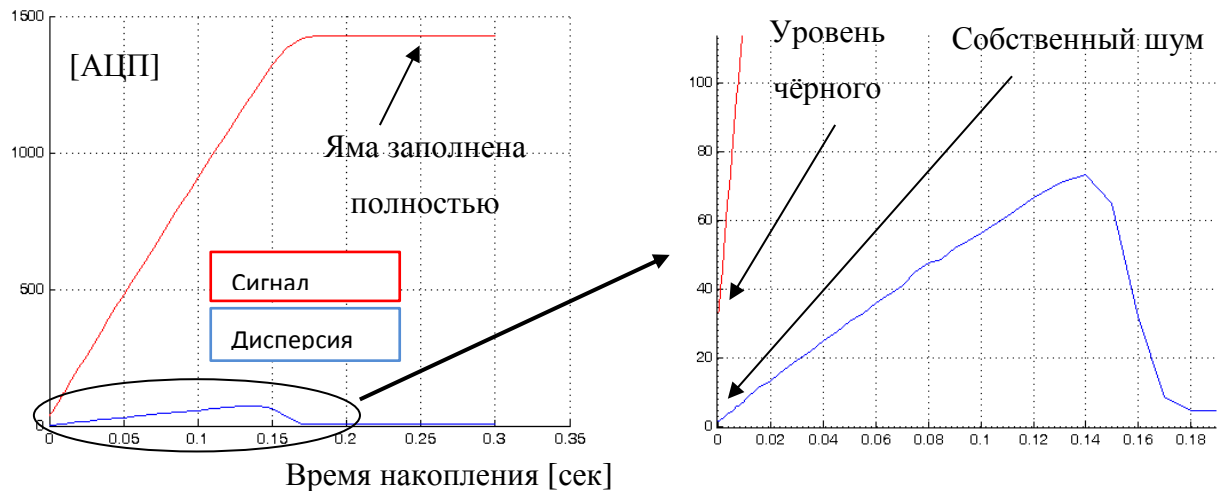


Рисунок 3.11. Зависимость среднего сигнала (красный) и дисперсии (синий) в уровнях АЦП при работе в кадровом режиме

Из уравнений (3.5-3.6) и Рисунка 3.11 видно, что количество электронов, приходящихся на один уровень АЦП, составляет 16,5 [e-/АЦП], а величина собственных шумов фотоприёмника равняется 20 [e-].

При больших временах накопления наблюдается полное заполнение ямы фотоприёмника, при этом зарядовая ёмкость потенциальной ямы составляет 23100[e-]. Заметим, что это значение немного больше заявленной производителем ёмкости фотодиода (20000 e-). Данное рассогласование связано с недостаточно точным выставлением напряжения на фотодиоде.

В специальном режиме электронного отслеживания ФПУ

В данном пункте работы проведено измерение основных энергетических характеристик (величины собственного шума, максимальной зарядовой емкости фотоприёмника) реализованного специального режима электронного отслеживания.

На Рисунке 3.12 представлена зависимость математического ожидания $E_{\text{ацп}}$ (Э) и дисперсии $D_{\text{ацп}}$ (Э) в единицах АЦП при работе камеры в режиме ЭО с количеством шагов отслеживания, равным 32. Из формулы (3.5) количество электронов, приходящихся на один уровень АЦП, составляет 15,04 [e-/АЦП], а

величина собственных шумов 18,7 [e⁻] соответственно. Полная зарядовая ёмкость потенциальной ямы составляет 46160 [e⁻].

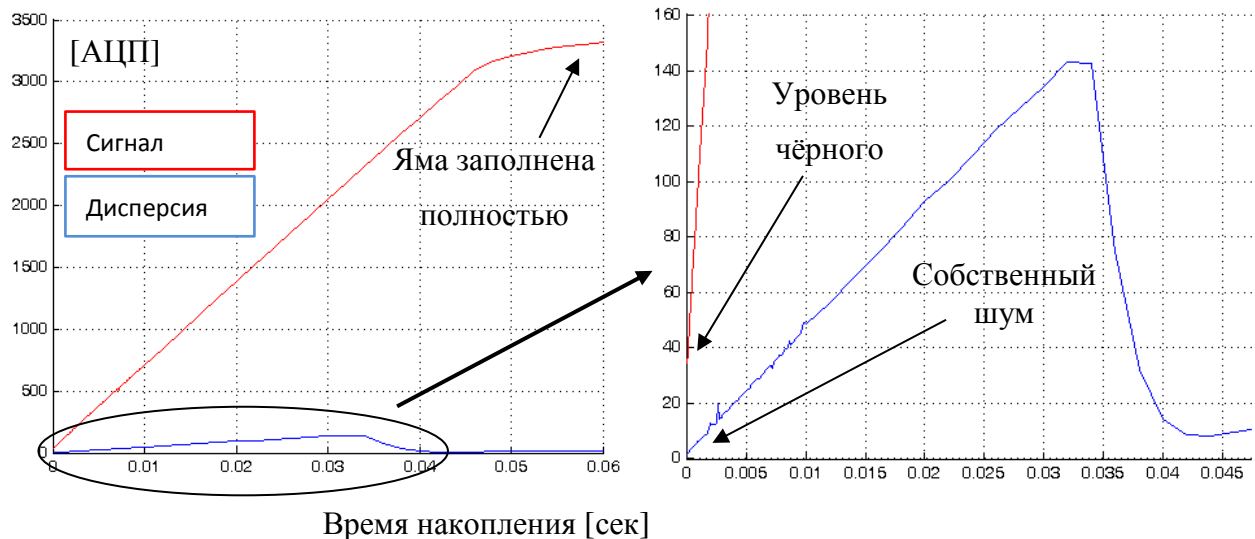


Рисунок 3.12. Зависимость среднего (красный) и дисперсии (синий) в уровнях АЦП при работе в специальном режиме ЭО

Из полученных результатов видно, что как в кадровом режиме, так и в режиме ЭО один уровень АЦП содержит примерно одинаковое количество электронов – 15. Величина собственных шумов фотоприёмника в обоих случаях одинакова и составляет около 20 [e⁻].

Но при этом максимальная зарядовая емкость фотоприёмника в режиме ЭО относительно стандартного кадрового режима существенно увеличилась с 23 [тыс. e⁻] до 46 [тыс. e⁻]. Это произошло вследствие того, что в кадровом режиме заряд накапливается без отслеживания и только в фотодиоде. А в режиме ЭО на каждом шаге накопления дополнительный заряд из фотодиода добавляется к зарядовому пакету, хранящемуся в вертикальном регистре, то есть зарядовая емкость ограничивается емкостью последнего. Таким образом, проведенное сравнение двух режимов работы строчно-кадровой ПЗС-матрицы подтверждает корректность реализации специального режима ЭО в части проверки энергетических характеристик. Далее проведем проверку специального режима электронного отслеживания на предмет возникновения дополнительного

частотно-пространственного рассогласования (например, не возникает ли дополнительный «смаз» в изображении).

3.3.3. Измерение функции передачи модуляции «смаза» и рассогласования режима ЭО

Одним из важных показателей качества передаточной системы, воспроизводящей изображение, является её функция передачи модуляции. ФПМ это безразмерная характеристика, определяемая как отношение величины контраста полученного изображения к величине контраста исходного объекта (формула 1.13). Общая функция передачи модуляции ФПУ является произведением трех частотных характеристик $\Phi ПМ_{\text{пикс}}$, $\Phi ПМ_{\text{рс}}$, $\Phi ПМ_{\text{смаз}}$ (формула 1.9).

$\Phi ПМ_{\text{пикс}}$ определяется чувствительностью вдоль апертуры единичного элемента фотоприемного устройства и не зависит от его режима работы.

Методика нахождения влияния «смаза» («рассогласования») заключается в измерении общей передаточной характеристики на выбранной пространственной частоте в отсутствии «смаза» («рассогласования») изображения и при его наличии. Тогда, искомые передаточные характеристики равны:

$$\Phi ПМ_{\text{смаз}} = \frac{\Phi ПМ_{\text{общ+смаз}}}{\Phi ПМ_{\text{общ}}} \quad (3.7)$$

$$\Phi ПМ_{\text{рс}} = \frac{\Phi ПМ_{\text{общ+смаз+рс}}}{\Phi ПМ_{\text{общ+смаз}}}, \quad (3.8)$$

где $\Phi ПМ_{\text{общ}}$ – характеристика в кадровом режиме,

$\Phi ПМ_{\text{общ+смаз}}$ – характеристика в режиме ЭО в присутствии «смаза» изображения при минимальном рассогласовании,

$\Phi ПМ_{\text{общ+смаз+рс}}$ – характеристика в режиме ЭО в присутствии «смаза» и рассогласования изображения.

Для измерения функции передачи модуляции был собран стенд, в состав которого входило следующее оборудование: камера со строчно-кадровой ПЗС-матрицей, коллиматор, осветительное устройство, поворотное устройство, держатель тест-объекта и тест-объект. В качестве тест-объекта выступала фотолитографическая пластина, содержащая черно-белый переход и штриховую структуру (прямоугольная мира, Рисунок 1.7). Такая структура формировала в фокальной плоскости камеры изображение с заданной пространственной частотой. Поворотное устройство обеспечивало движение изображения.

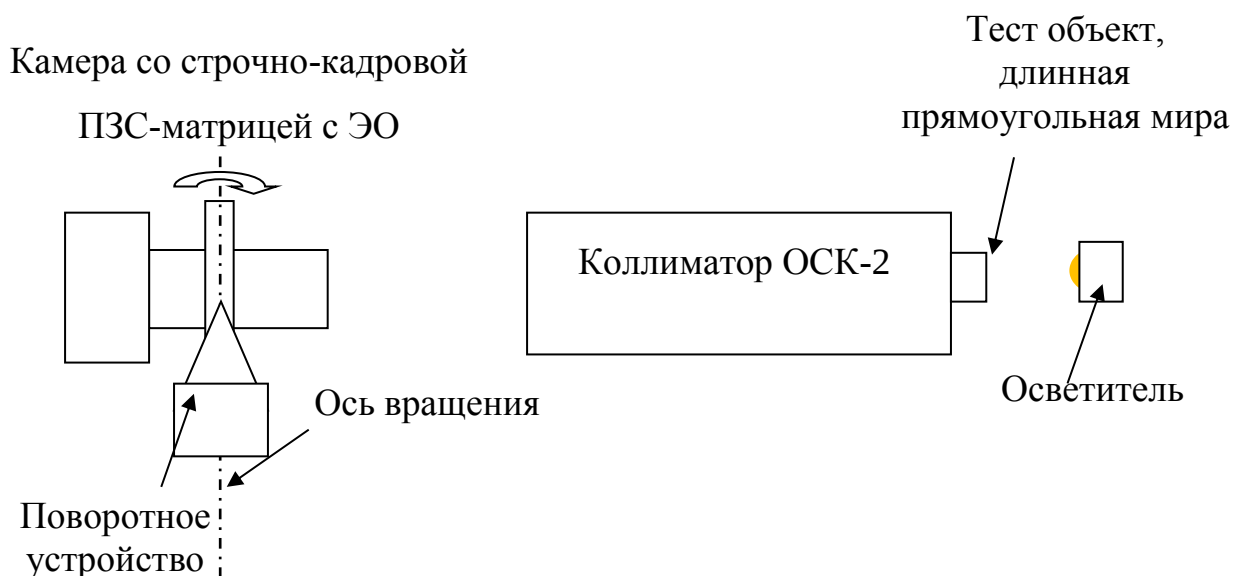


Рисунок 3.13. Стенд для измерения $\Phi ПМ_{смаза}$ и $\Phi ПМ_{рс}$

Вычисление функции передачи модуляции на заданной пространственной частоте проводилось в соответствии с методикой, описанной в 1.3.3 данной работы.

ФПМ звена «смаза» изображения

В реальных системах оптико-электронного наблюдения поверхности Земли, когда фотоприемником фиксируется бегущее изображение, всегда имеет место явление «смаза» изображения. Величина «смаза» изображения зависит от относительной скорости движения изображения в плоскости ФПУ и от времени экспозиции. Для ФПУ, работающих в режиме ЭО, на величину «смаза»

изображения влияет время экспозиции на одном шаге накопления, и «смаз» не зависит от количества шагов накопления.

Для понимания эффекта «смаза» изображения именно в реализации ЭО на строчно-кадровой ПЗС-матрице рассмотрим процесс тактирования режима ЭО. Тактовые диаграммы напряжений между фотодиодом и подложкой, фотодиодом и вертикальным регистром представлены на Рисунке 3.14.

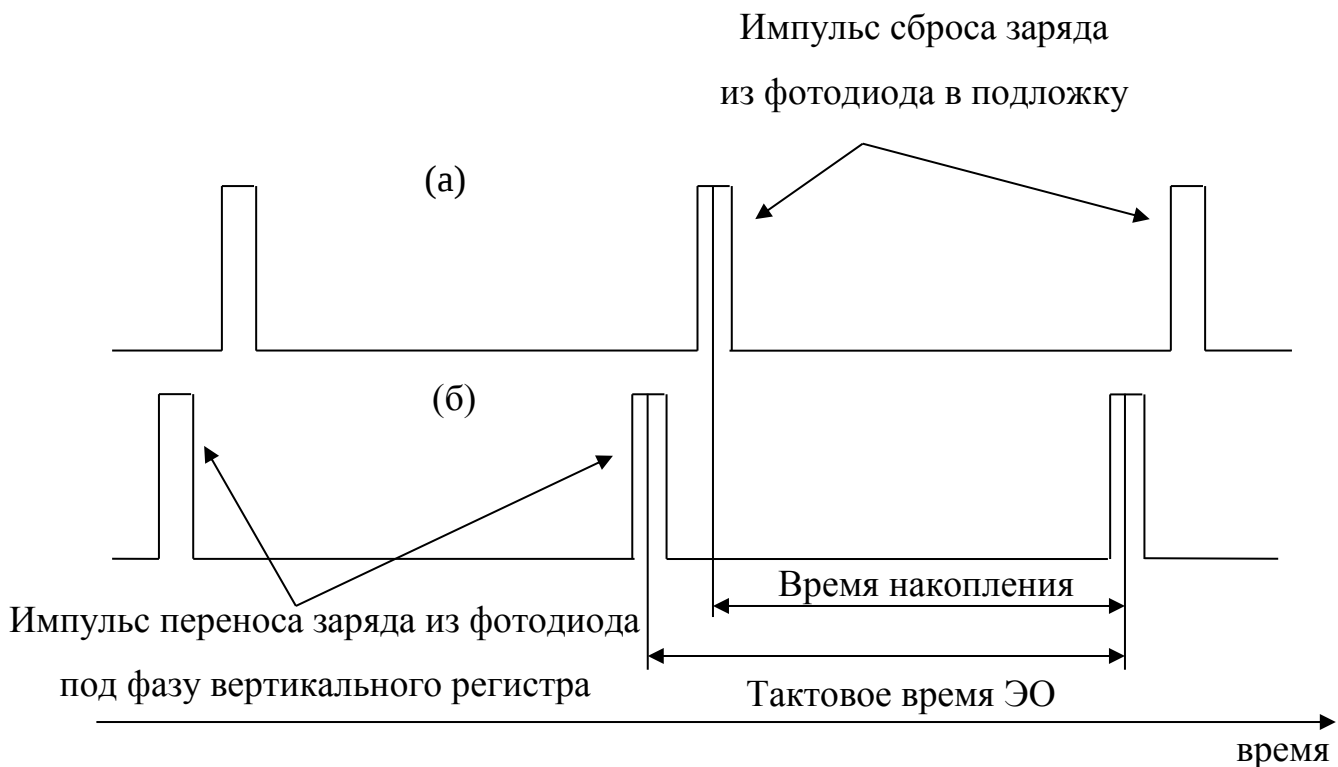


Рисунок 3.14. Тактовая диаграмма импульсов переноса заряда из фотодиода в подложку (а) и под фазу вертикального регистра (б)

В фотодиоде осуществляется непрерывное накопление сигнального заряда, с периодическим переносом полезного сигнала под фазу вертикального регистра и сбросом лишнего заряда в подложку. Тактовое время ЭО равно времени перемещения элемента изображения на одну строчку матрицы и соответствует перемещению изображения на одну строку. Данное время ограничено импульсами переноса заряда из фотодиода под фазу вертикального регистра.

После сброса заряда в подложку происходит накопление нового заряда до тех пор, пока зарядовый пакет не переместится под фазу вертикального регистра.

Начало времени экспозиции сигнала определяется сбросом заряда из фотодиода в подложку матрицы, а конец экспозиции характеризуется перемещением зарядового пакета в вертикальный регистр. Таким образом, в реализации режима ЭО существует возможность изменять время накопления от нулевого значения до величины тактового времени. Далее будет экспериментально показано, что уменьшение времени экспозиции на каждом шаге накопления влечет за собой уменьшение «смаза» и как следствие улучшение соответствующей функции передачи модуляции.

В качестве аппаратной функции «смаза» изображения выступает прямоугольная функция с шириной $\Delta_{\text{смаза}} = V_{\text{б.л.}} \cdot T_n$ (где $V_{\text{б.л.}}$ – скорость бега изображения в плоскости ФПУ, а T_n – время накопления на каждом шаге). Поэтому расчётная передаточная функция определяется в соответствии с формулой:

$$\Phi_{\text{ПМ}}^{\text{смаза}}(\nu) = \text{sinc}(\pi \nu \Delta_{\text{смаза}}) \quad (3.9)$$

На Рисунке 3.15 представлено значение $\Phi_{\text{ПМ}}^{\text{смаза}}$ при различных величинах «смаза» (синий цвет), расчётная функция показана красным цветом. Измерение производилось для частоты равной 0,64 частоты Найквиста, при этом количество шагов накопления равнялось 4, скорость бега изображения 14,5 мм/сек, время пролета изображением одной строки 0,379 мс. Из графиков видно, что понижение ФПМ соответствует теоретической предпосылке (формула 3.9). А, следовательно, при работе режима ЭО не возникает никакого дополнительного «смаза» в изображении.

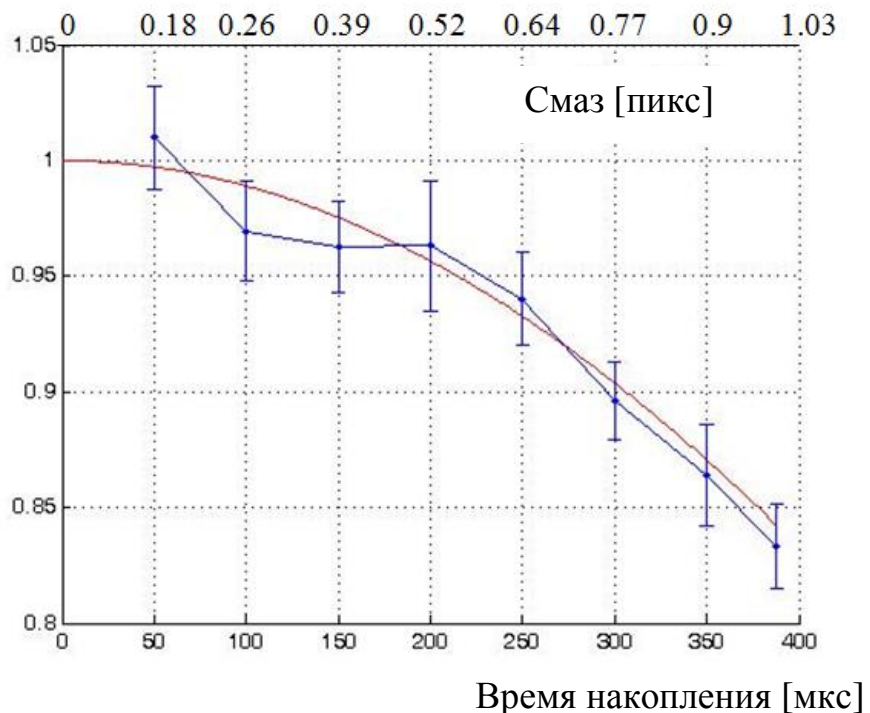


Рисунок 3.15. Функция передачи модуляции «смаза» изображения исследовательского образца строчно-кадровой ПЗС-матрицы, работающей в режиме ЭО

ФПМ звена «рассогласования» изображения

Если фотоприемник работает в режиме электронного отслеживания изображения и имеет место рассогласование скорости бега изображения со скоростью переноса информационных зарядовых пакетов, то возникают частотные искажения. Основными причинами рассогласования скоростей при решении задач ДЗЗ являются:

- ошибка наведения осей космического аппарата,
- недостаточная стабилизация осей космического аппарата,
- зависимость векторно-скоростного поля бега изображения в плоскости ФПУ от угловой координаты поля объектива.

Стенд для измерения $\Phi ПМ_{pc}$ представлен на Рисунке 3.13. ФПМ рассогласования измерялась при следующих параметрах: пространственная частота – 0,64 Найквиста, количество задействованных шагов накопления – 16,

скорость перемещения зарядовых пакетов изменялась от 17,2 до 29 [мм/сек], причем, время накопления на каждом шаге накопления максимально и равно тактовому времени переноса заряда.

Теоретическая зависимость выражается формулой:

$$\Phi PM_{pc}(v) = \text{sinc}(\pi v \Delta_{pc}) \quad (3.10)$$

где Δ_{pc} - величина рассогласования изображения, выраженная в пикселях ФПУ.

Расчетная зависимость ΦPM_{pc} представлена на Рисунке 3.16 красным цветом, а полученная экспериментально зависимость показана синим цветом.

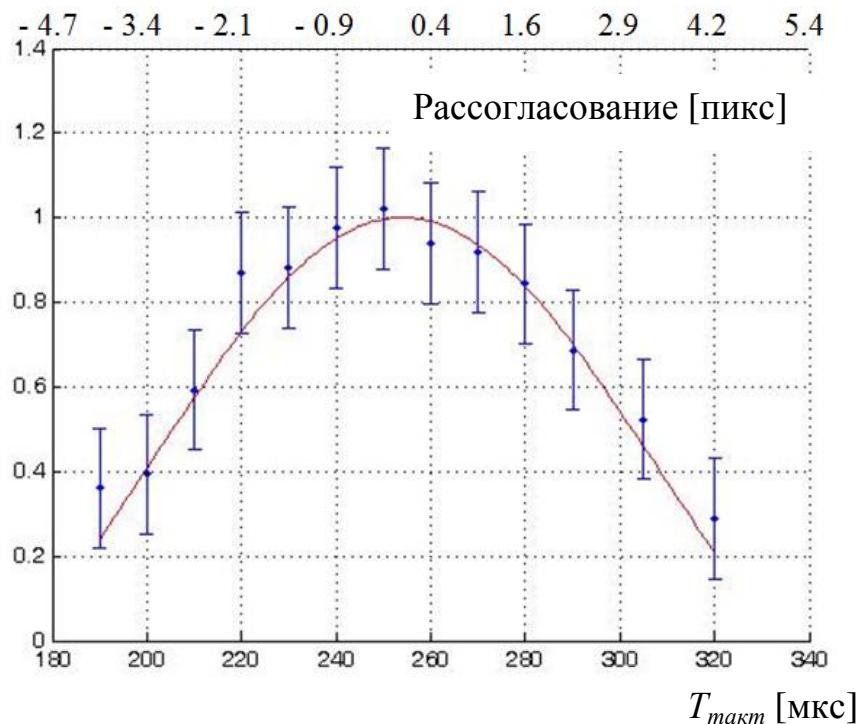


Рисунок 3.16. Функция передачи модуляции рассогласования изображения исследовательского образца ПЗС ФПУ, работающей в режиме ЭО, $T_{такт}$ – тактовое время переноса зарядовых пакетов в вертикальном регистре режима ЭО

Совпадение экспериментальных значений ΦPM_{pc} с теоретическим расчетом также подтверждает корректность использования реализованного режима ЭО строочно-кадровой ПЗС-матрицы.

Выводы по Главе 3

В современных космических системах наблюдения одним из важных конструктивных элементов аппаратуры является фотоприемное устройство. Для решения различных задач используется ФПУ разной архитектуры построения.

Для реализации гиперспектральной оптико-электронной аппаратуры с методом комбинированного отслеживания требуется разработка особого режима высокочувствительной съемки на базе использования кадрового фотоприемника. Проведенный в данной главе анализ архитектур фотоприемных устройств показал, что такая задача может быть решена за счет реализации специального режима ЭО на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы.

В главе приведено описание алгоритма работы строчно-кадровой ПЗС-матрицы в режиме ЭО. Так процесс формирования изображения состоит из двух основных этапов: этап накопления сигнала и этап считывания всего кадра. Во время накопления сигнала производится отслеживание движущегося изображения за счет передвижения зарядовых пакетов в вертикальном регистре, с периодическим добавлением дополнительного заряда из фотодиода.

Для экспериментальной проверки работоспособности реализованного режима ЭО было скомплексировано два стенда для проверки энергетических и частотно-пространственных характеристик. Проведенное измерение чувствительности реализованного режима ЭО для разного количества шагов накопления показало корректное пропорциональное увеличение этой характеристики. Величина собственных шумов фотоприёмника в реализованном режиме и стандартном кадровом режиме одинакова, а, следовательно, не возникает дополнительных шумов. Также была определена величина максимальной зарядовой ёмкости, которая соответствует ёмкости вертикального регистра. Экспериментальное изучение ФПМ режима ЭО матрицы подтвердило факт отсутствия дополнительных частотных искажений.

Глава 4 Исследование влияния воздействия протонов на строчно-кадровую ПЗС-матрицу, работающую в режиме ЭО и в кадровом режиме

Известно, что вследствие воздействия космической радиации при эксплуатации оптико-электронных камер дистанционного зондирования на околоземных орбитах происходит деградация её компонент [75]. Поэтому, с точки зрения перспектив практического использования космических ГСК с новыми аппаратно-программными конструктивными решениями, важным является вопрос устойчивости к воздействию космической радиации наиболее критичных к такому воздействию элементов ГСК. Для обеспечения режима КОИ ключевыми являются предложенные в работе новые аппаратно-программные решения по щелевому (ЩУ на базе МКМ) и фотоприемному (ФПУ на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы) устройствам ГСК. Существуют добротные исследования, связанные с изучением влияния радиации на характеристики МКМ, которые широко применяются в других приборах космического назначения [76]. Поэтому в работе проведено экспериментальное исследование поведения на предмет устойчивости к воздействию космической радиации включенного в работу КОИ ГСК режима ЭО ФПУ.

В магнитосфере Земли присутствуют две области с повышенной радиацией: первая расположена на расстоянии от 300 км от поверхности Земли (Бразильская аномалия) до 6000 км – внутренний радиационный пояс Земли (РПЗ), вторая область располагается от 12000 км до 40000 км – внешний радиационный пояс Земли. Так как для большинства ОЭА средств ДЗЗ высота орбит составляют менее 1000 км, то именно внутренний радиационный пояс Земли (РПЗ) оказывает наибольшее влияние на аппаратуру. Основным компонентом космической радиации для внутреннего пояса Земли являются протоны, причем максимальная плотность протонов с большей энергией располагается ниже, чем для протонов с меньшей энергией. Так максимальная плотность протонов с энергией 400 МэВ

находится на высоте 1200 км в плоскости экватора, а у протонов с энергией 1 МэВ на высоте 6000 км. Более подробно состав и структура РПЗ рассмотрена в работе [77].

Один из способов минимизации эффектов воздействия радиации является физическая защита радиационно-нестойких компонент прибора. В качестве защитного барьера может выступать металлический кожух. И чем больше толщина стенок такого кожуха, тем меньше вероятность преодолеть барьер радиационными частицами. Также стоит отметить, что защитный барьер более эффективен для электронов и значительно менее эффективен для протонов [78]. Так суммарная доза за защитой из 7,5 мм алюминия практически полностью состоит из протонов. А значит, устранение влияния дефектов, возникающих при воздействии именно этих частиц, является приоритетной задачей.

Неотъемлемой частью устройств наблюдения является ФПУ, регистрирующее излучение. Изменение некоторых параметров ФПУ, влияющих на работоспособность строчно-кадровой ПЗС-матрицы при воздействии протонов с разными энергиями, также рассмотрено в работах [75] [79].

Отличие настоящей главы от указанных выше работ заключается в описании результатов исследования радиационных дефектов для режима электронного отслеживания [80]. Помимо этого в работе предложен и реализован способ устранения влияния дефектов при различных параметрах и режимах работы ФПУ. Варьируемые величины были выбраны таким образом, чтобы они максимально детально воспроизводили требования и условия функционирования оптико-электронной системы в процессе космического эксперимента. К таким параметрам относятся: время накопления в кадровом режиме, скорость переноса заряда по ФПУ, количество шагов отслеживания, время накопления на каждом шаге отслеживания, период хранения заряда в вертикальном регистре на каждом шаге отслеживания. Заметим, что в процессе космической съёмки температура ФПУ может существенно измениться вследствие выделения тепла самой ФПУ.

Поэтому исследование зависимости темнового тока центров повышенной генерации от температуры, а также устранение влияния этих дефектов на изображение также являются задачами данной работы.

4.1. Характеристики и условия облучения исследуемого образца ФПУ

Эксперимент по облучению проводился в первом квартале 2013 г. на синхроциклотроне в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ). ФПУ облучалось пучком высокоэнергетичных протонов, вектор скорости полета которых был нормален к фоточувствительной поверхности ПЗС-матрицы.

Исходя из анализа проведенных ранее с участием автора результатов летных испытаний строчно-кадровых матриц в составе разработанных АО «НПО «Лептон» звёздных датчиков, используемых на реальных КА, были выбраны соответствующие дозы для облучения, которые подбирались таким образом, чтобы величина и количество дефектов соответствовала дефектам матриц прошедших летные испытания в составе звездных датчиков в течение 6 месяцев на высоте 800 км, с параметром сравнения: количество дефектных столбцов с яркостью более 5 значений СКО необлученного ФПУ. При этом доза облучения составила $1,43 \cdot 10^{10}$ Прот/см².

В качестве объекта облучения выступала строчно-кадровая ПЗС-матрица KAI-16070 [81] со следующими техническими характеристиками:

- размер пикселя 7,4x7,4 мкм²;
- ширина вертикального регистра 2,8 мкм;
- ширина фотодиода 2,0 мкм;
- высота фотодиода 5,5 мкм.

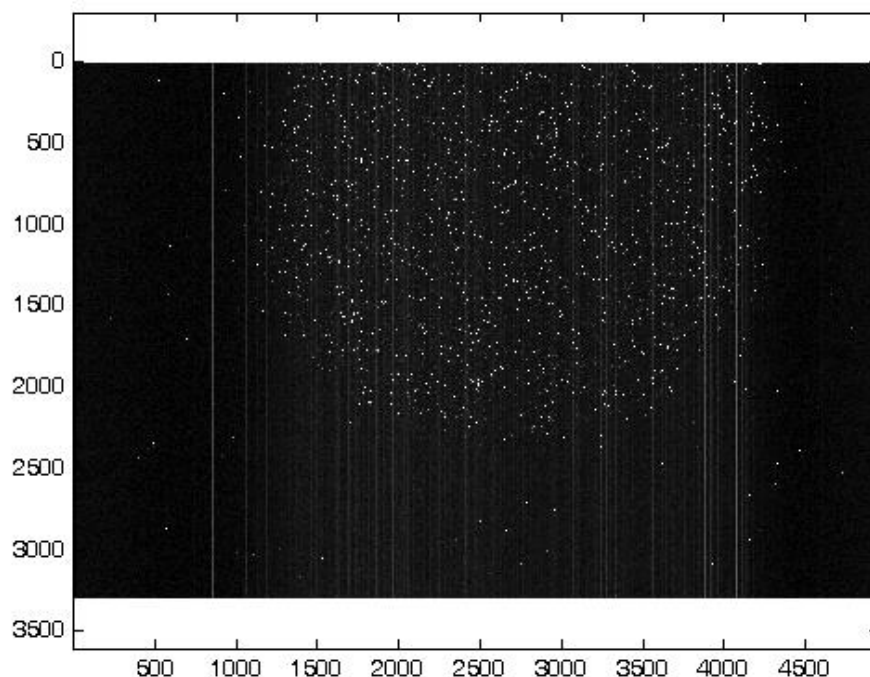


Рисунок 4.1. Кадр строчно-кадровой ПЗС-матрицы после облучения

В процессе эксперимента фотоприемное устройство облучалось пучком протонов диаметром менее 20 мм, в то время как фоточувствительная область КАИ-16070 имеет размеры 35x24 мм². На Рисунке 4.1 показан кадр ФПУ после облучения, на котором явно видно, что размер пучка протонов меньше фотозоны матрицы. Данный факт позволил наблюдать и сравнивать облученные и необлученные образцы непосредственно на одном фотоприёмном устройстве, а также производить нормировку интенсивностей генерации «паразитного» сигнала от дефектов относительно не облученных зон.

После облучения в ФПУ возникли дефекты в виде центров повышенной генерации электронно-дырочных пар в области фотодиода (точечные дефекты) и под фазами вертикального регистра (столбцы с повышенной яркостью) [82]. Такие радиационные дефекты приводят к увеличению геометрического шума изображения, а, следовательно, негативно влияют на итоговую частотную сигнально-шумовую характеристику всего прибора в целом. Далее рассмотрим

поведение дефектов в стандартном кадровом режиме ПЗС-матрицы и в специальном режиме ЭО.

4.2. Изучение поведения радиационных дефектов в кадровом режиме

Сигнал радиационного дефекта определяется временем нахождения зарядового пакета вблизи рассматриваемого центра повышенной генерации. Поэтому при работе ФПУ в кадровом режиме темновой заряд фотодиода зависит от времени накопления, и равен нулю при нулевом времени. Темновой заряд вертикального регистра в свою очередь зависит только от тактовой частоты переноса заряда. Таким образом, если в кадровом режиме время накопления равно или близко к нулю, то сигнал фотоприемника будет состоять только из темнового тока вертикального регистра (Рисунок 4.2), что позволяет выделить дефекты, связанные именно с вертикальным регистром.

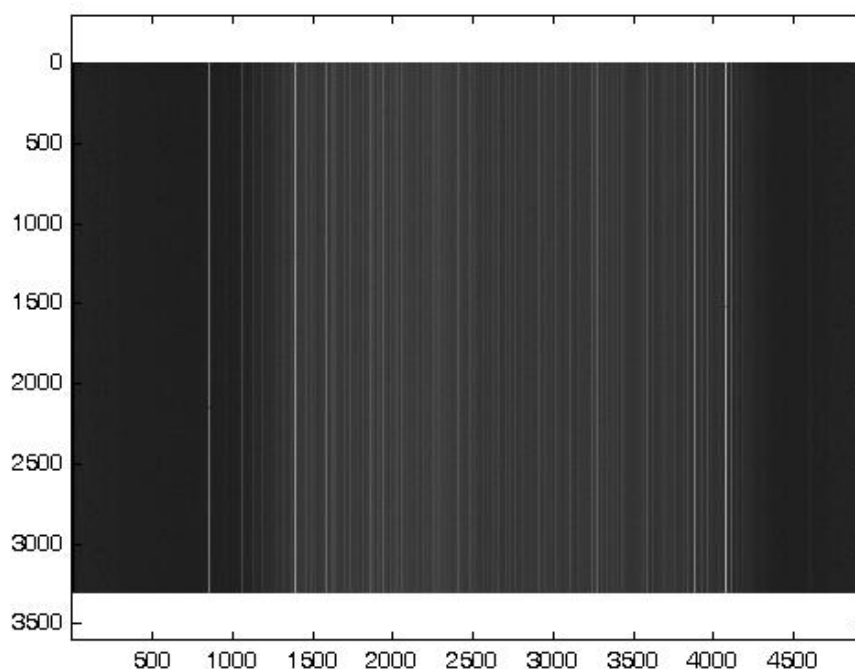


Рисунок 4.2. Темновой кадр ФПУ в кадровом режиме при времени накопления равном нулю

4.2.1 Дефекты вертикального регистра в кадровом режиме

Дополнительный темновой ток в вертикальном регистре образуется вследствие наличия единичных центров повышенной генерации после воздействия радиационного излучения. Центры повышенной генерации темнового тока в каждом вертикальном регистре располагаются в одном или нескольких пикселях ФПУ. А проявляются дефекты в кадровом режиме в виде вертикальных столбцов повышенной яркости только из-за непрерывного тактирования вертикального регистра. Достоверность такого утверждения о пиксельной локализации дефектов вертикального регистра будет подтверждена далее (пункт 4.3).

Зависимость темнового тока вертикальных регистров от времени накопления

Для кадрового режима интенсивность сигнала вертикального регистра определяется временем чтения одной строки ФПУ, и не зависит от времени накопления, Рисунок 4.3. А время чтения одной строки задается один раз и не меняется во время проведения испытаний. Поэтому требуется только одноразовый учет зависимости такого сигнала без привязки к временны параметрам работы камеры.

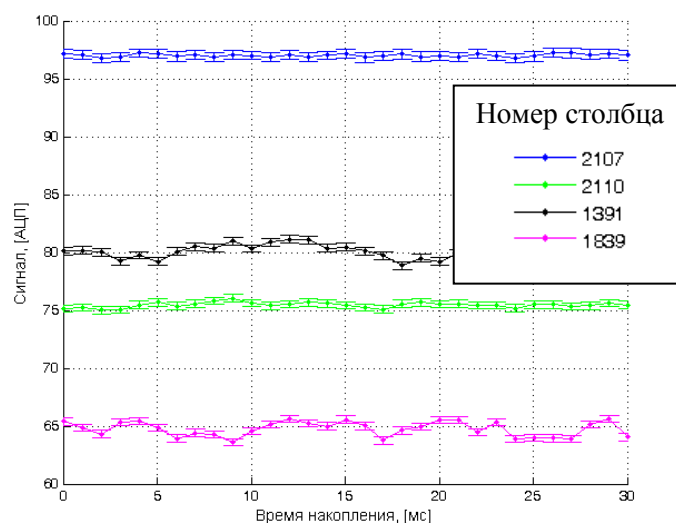


Рисунок 4.3. Зависимость сигнала от времени накопления для некоторых (ярких) столбцов

Зависимость темнового тока вертикальных регистров от температуры

К одному из параметров, которые существенно влияют на сигнал радиационных дефектов, относится температура ФПУ. В качестве основного процесса генерации темновых электронно-дырочных пар выступает генерация через промежуточные уровни в запрещенной зоне. Основную роль в этом процессе играют уровни, расположенные вблизи середины запрещенной зоны. Поэтому при проведении температурной коррекции дефектов в стандартном подходе учитываются только переходы с энергией $\frac{E_g}{2}$ (E_g – ширина запрещенной зоны).

В этом случае при описании зависимости величины темнового тока от температуры в стандартном подходе используют формулу [83] [84] [85]:

$$I = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{\frac{-E_g}{2kT}}, \quad (4.1)$$

где A – темп генерации (для каждого дефекта коэффициент различный),

T – температура в градусах Кельвина,

E_g – ширина запрещённой зоны,

k – постоянная Больцмана.

Но если наибольшее количество разрешенных уровней располагается не строго посередине запрещенной зоны, а находится ближе к валентной зоне либо к зоне проводимости полупроводника, то формула (4.1) описывает температурную зависимость недостаточно точно. Поэтому в данной работе была предложена функциональная зависимость темнового тока от температуры, описывающая положение «глубоких» уровней в запрещенной зоне более точно:

$$I = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{\frac{-E_g}{\alpha kT}}, \quad (4.2)$$

где α – коэффициент, характеризующий расположение разрешенных уровней в запрещенной зоне, для случая, когда разрешенные уровни находятся вблизи середины запрещенной зоны, $\alpha = 2$.

Согласно формуле (4.2) в процессе эксперимента сигнал в каждом столбце аппроксимируется функцией:

$$S = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{-\frac{E_g}{\alpha \cdot k \cdot T}} + B, \quad (4.3)$$

где S – сигнал, B – уровень черного.

Параметр уровня черного определяется в процессе наземной калибровки и в дальнейшем его исправление не требуется.

Так как промежуточные уровни различных центров генерации темнового тока располагаются в разных местах запрещенной зоны, параметр α для разных центров генерации различен и его, совместно с темпом генерации A , необходимо определить во время калибровки.

Для определения температурной зависимости темнового тока дефектов в вертикальном регистре производилась непрерывная съемка кадров с постепенным изменением температуры ПЗС-матрицы от минус 20 градусов до плюс 50 градусов Цельсия. В качестве измерительного инструмента температуры выступала термопара, размещенная в непосредственной близости от ПЗС-матрицы.

В процессе обработки температурной зависимости сигналов дефектов аппроксимация производилась по методу наименьших квадратов. А для удобного численного представления темпа генерации использовалось значение нормированного сигнала S при определенной температуре $T=300$ К. Нормировка интенсивности производилась по вертикальным регистрам, не подвергшимся воздействию облучения. На Рисунке 4.4 представлены температурные зависимости и их аппроксимации для некоторых центров повышенной генерации, а также приведены значения интенсивности S и коэффициента α , который характеризуют расположение разрешенных уровней в запрещенной зоне.

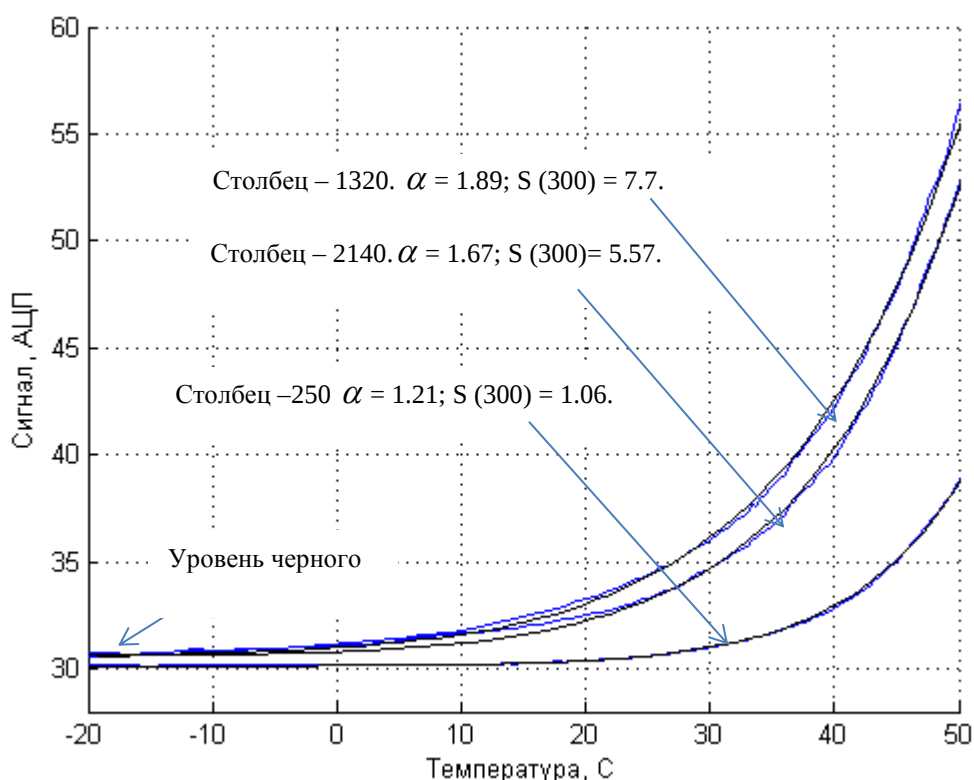


Рисунок 4.4. Зависимость сигнала нескольких столбцов (вертикальных регистров) от температуры

Корректировка темнового тока вертикального регистра

При эксплуатации прибора в условиях воздействия космической радиации происходит непрерывная генерация новых дефектов. Поэтому необходимо проводить калибровку для каждой съемки.

При проведении калибровки предлагается последовательно устранять последствия от дефектов вертикальных регистров и от фотодиодов. Для этого в кадровом режиме сначала при нулевом времени накопления измеряется интенсивность сигнала вертикальных регистров, а потом соответствующий сигнал вычитается из кадра с ненулевым временем экспозиции, тем самым последующие изображения содержат только сигнал от дефектов фотодиода, устранение которых будет показано в пункте 4.2.2.

Как было сказано выше дефект характеризуется двумя параметрами – α и A , а, следовательно, необходимо произвести калибровочную съемку темновых кадров как минимум при двух различных значениях температур ФПУ. Например,

произвести измерение темнового сигнала до и после проведения основной съемки. Данной информации необходимо и достаточно для определения для каждого дефекта функциональной зависимости (4.3).

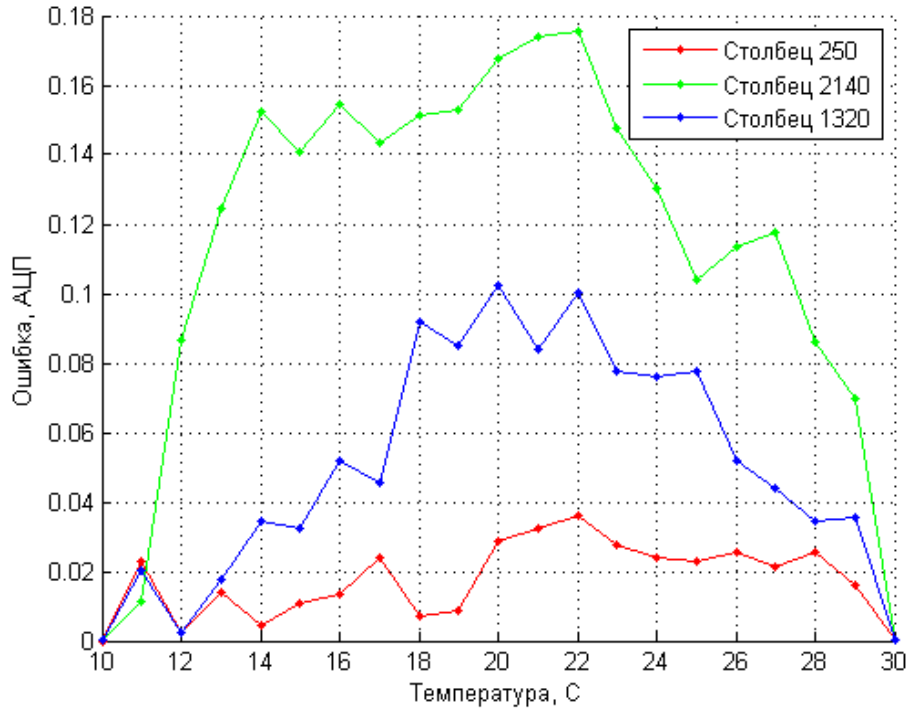


Рисунок 4.5. Ошибка аппроксимации для нескольких столбцов. Ошибка аппроксимации не превышает долей уровня АЦП, что значительно меньше шума считывания и квантования

Пусть $S_1(n)$ и $S_2(n)$ калибровочные сигналы при температурах T_1 и T_2 радиационного дефекта с порядковым номером n , тогда параметры $\alpha(n)$ и $A(n)$ в соответствии с пунктом 4.2.1.2 выражаются следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha(n) = \frac{E_g \cdot (T_1 - T_2)}{k \cdot \lg \left(\left(\frac{S_1(n)}{S_2(n)} \right) \cdot \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1.5} \right) \cdot T_1 \cdot T_2} \\ A(n) = \frac{S_1(n) \cdot e^{\frac{E_g}{\alpha(n) \cdot k \cdot T_1}}}{T_1^{1.5}} \end{array} \right. \quad (4.4)$$

И искомый сигнал от дефекта вертикального регистра n при температуре T :

$$S(n) = A(n) \cdot T^{1,5} \cdot e^{-\frac{E_g}{\alpha(n) \cdot k \cdot T}} \quad (4.5)$$

Пусть температура до начала съемки T_1 , после проведения съемки T_2 . Определим параметр эффективности устранения влияния радиации в этом диапазоне температур: $T_1 - T_2$. На Рисунке 4.5 показана ошибка аппроксимации сигнала для нескольких столбцов в диапазоне температур: $T_1=10$ С, $T_2=30$ С. Подавление темнового тока в данном диапазоне температур составило более 25 раз, что почти в 3,5 раза выше чем при использовании стандартной аппроксимирующей функциональной зависимости (4.1).

4.2.2. Дефекты фотодиода в кадровом режиме

Для корректного исследования характеристик темнового тока фотодиода необходимо предварительно устранить влияние дефектов вертикального регистра (пункт 4.2.1), после этого возможно исследовать и корректировать сигналы от дефектов фотодиода. Рассмотрим поведение темнового тока фотодиода для различных значений температуры ФПУ и времени накопления.

Зависимость темнового тока фотодиода от времени накопления

Интенсивность сигнала определяется временем нахождения заряда рядом с центром повышенной генерации электронно-дырочных пар, для фотодиодов таким определяющим временем является время накопления T_n . Экспериментально была измерена средняя величина сигнала части дефектов, для разного времени накопления. Рассматриваемая зависимость аппроксимируется линейной характеристикой проходящей через начало координат с точностью не хуже 1,4 %.

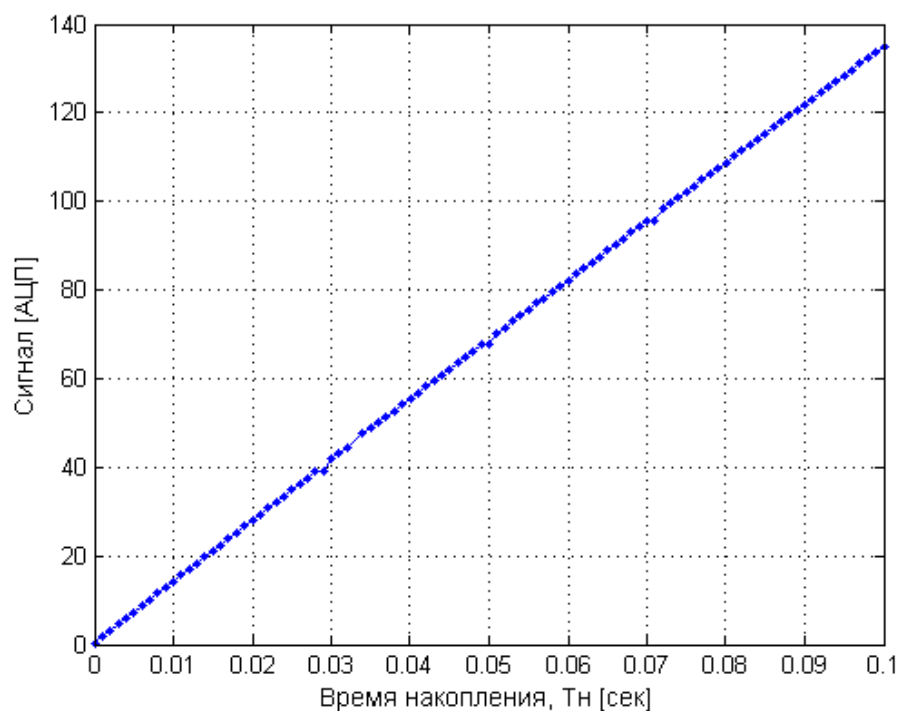


Рисунок 4.6. Зависимость темнового тока горячих пикселей от времени накопления

Зависимость темнового тока фотодиода от температуры

В качестве характеристики выбрана функциональная зависимость, аналогичная зависимости поведения дефектов вертикальных регистров. Формула, описывающая поведение сигнала каждого дефекта фотодиода, выглядит следующим образом:

$$I = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{\frac{-E_g}{\alpha k T}}, \quad (4.6)$$

где A – коэффициент пропорциональности (для каждого пикселя различный),

T – температура в градусах Кельвина,

E_g – ширина запрещённой зоны кремния (1,12 эВ для $T=300$ K),

α – коэффициент, характеризующий расположение разрешенных уровней в запрещенной зоне.

Для определения температурной зависимости темнового тока дефектов в фотодиоде производилась непрерывная съемка кадров с постепенным изменением температуры от минус 10 градусов до плюс 50 градусов Цельсия. В процессе эксперимента сигнал для каждого фотодиода по методу наименьших квадратов аппроксимировался функцией с параметрами α и A . Заметим также, что при измерении дефектов в вертикальном регистре, параметр уровня черного был учтен и дополнительно его вычитание не требуется.

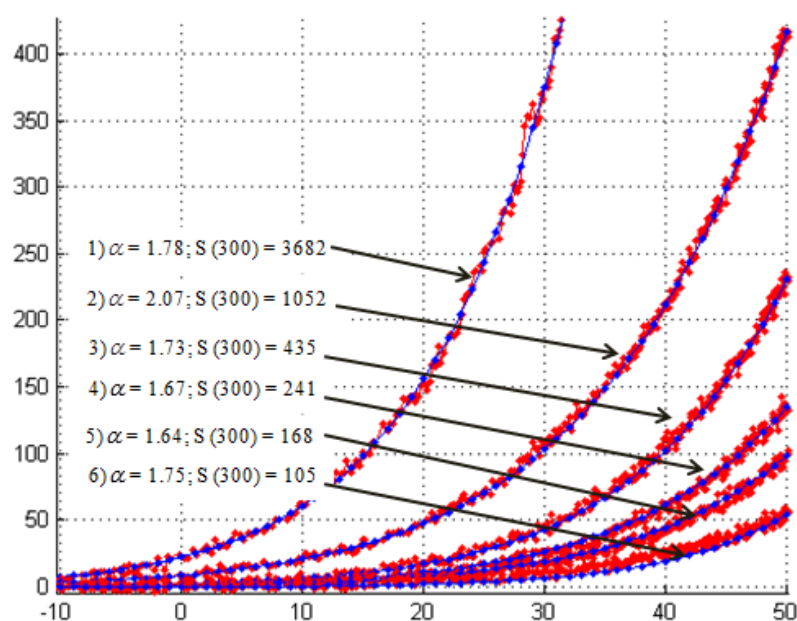


Рисунок 4.7. Сигнал от некоторых горячих пикселей (красный график), и аппроксимация данного сигнала (синий график)

На Рисунке 4.7 представлена зависимость темнового тока фотодиода от температуры для нескольких горячих пикселей различной яркости. Темп генерации S удобно представлять в виде величины превышения сигнала от дефекта по отношению к сигналу «непоражённого» фотодиода. Нормировка проведена по усредненному сигналу от группы фотодиодов, не подвергшихся воздействию радиации. Коэффициент увеличения сигнала S приведен для значения температуры в 300 K.

Также видно, что параметр α в точности не равняется значению 2, и в большинстве случаев располагается немного ниже этого уровня. Факт

расположения коэффициента α чуть ниже 2, указывает на то, что определяющей величиной энергии перехода выступает не $\frac{E_g}{2}$, а большая энергия $\frac{E_g}{\alpha} > \frac{E_g}{2}$. Что согласуется с предположением о смещенном расположении разрешенных уровней от середины запрещенной зоны полупроводника.

Корректировка темнового тока фотодиода

1) Температурная поправка

Во время космических испытаний не предполагается возможным производить полноценную калибровку в широком диапазоне температур. Поэтому температурная аппроксимация вычисляет только по известным сигналам при двух температурах: до съемки $T1$ и после съемки $T2$. На Рисунке 4.8 представлена зависимость ошибки аппроксимации от температуры, для которой она производится.

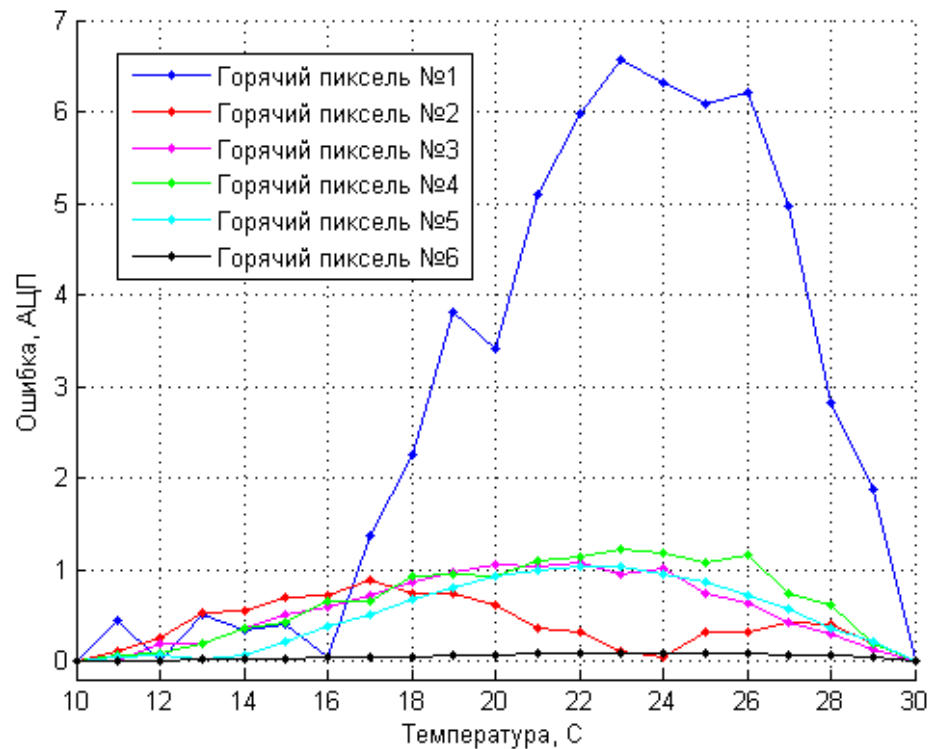


Рисунок 4.8. Ошибка температурной коррекции, номера пикселей соответствуют номерам приведенных на Рисунке 4.7

Формулы для расчета параметров температурной зависимости аналогичны формулам для дефектов вертикальных регистров (4.4). Проверки подвергались произвольные изображения с температурой $T_1 < T < T_2$. При этом коэффициент подавления сигнала дефектов в диапазоне температур $T_1 = 10^\circ\text{C}$, $T_2 = 30^\circ\text{C}$ составляет более чем 35 раз, что в 3,5 раза выше чем при использовании стандартной аппроксимирующей функциональной зависимости (4.1).

2) Поправка, учитывающая изменение времени накопления ФПУ

Из пункта 4.2.2.1 следует, что зависимость сигнала горячих пикселей от времени накопления характеризуется линейным законом с началом в точке (0,0). Тогда для известной интенсивности $I_{hp,Tn0}$ при времени накопления T_{n0} сигнал при времени накопления T_{n1} определяется в соответствии с:

$$I_{hp,Tn1} = \frac{I_{hp,Tn0} \cdot T_{n1}}{T_{n0}} \quad (4.7)$$

4.3. Изучение поведения радиационных дефектов в специальном режиме ЭО

Поведение радиационных дефектов для строчно-кадровой ПЗС матрицы функционирующей в стандартном кадровом режиме неоднократно анализировалось в работах других исследователей. В свою очередь, в специальном режиме ЭО последствия дефектов отличаются и не являются изученными.

Особенность режима ЭО заключается в возможности локализации мест, в которых происходит генерация темнового тока в вертикальном регистре с точностью до пикселя. Принцип локализации центров повышенной генерации электронно-дырочных пар в вертикальном регистре основан на том, что под фазами считывания и накопления заряд находится разное время. Действительно, в режиме ЭО движение зарядовых пакетов вдоль вертикального регистра состоит из двух составляющих: фаза накопления и фаза считывания. В фазу накопления заряд находится под фазами вертикального регистра время, равное времени

пролета изображением одного пикселя (для ГСК $\approx 5 \div 20$ мс). Во время фазы считывания заряд перетекает на один пиксель по вертикальному регистру за «быстрое» тактовое строчное время выходного устройства (≈ 20 мкс).

$N_{\text{ЭО}}=1$, соответствует кадровому режиму

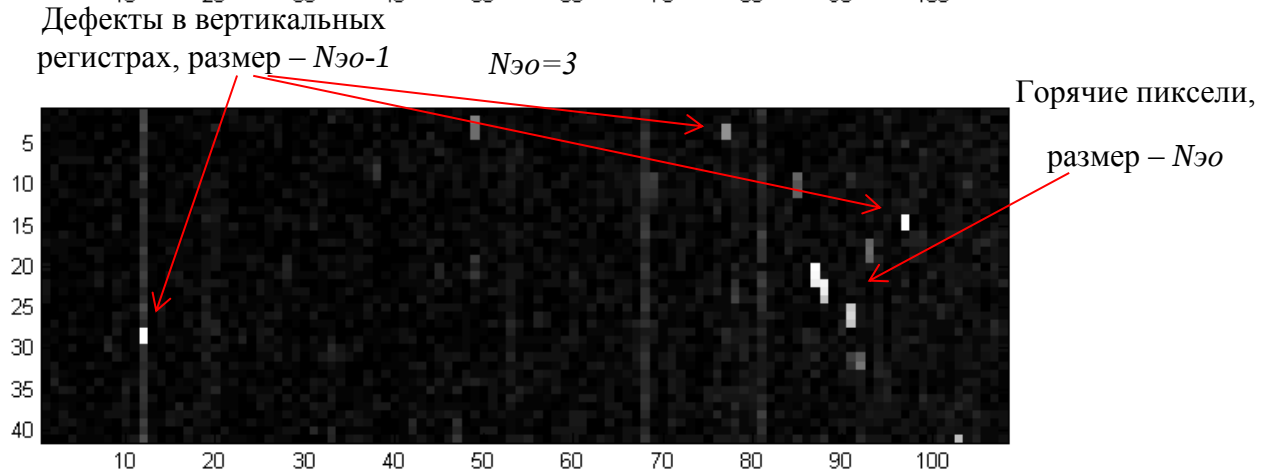
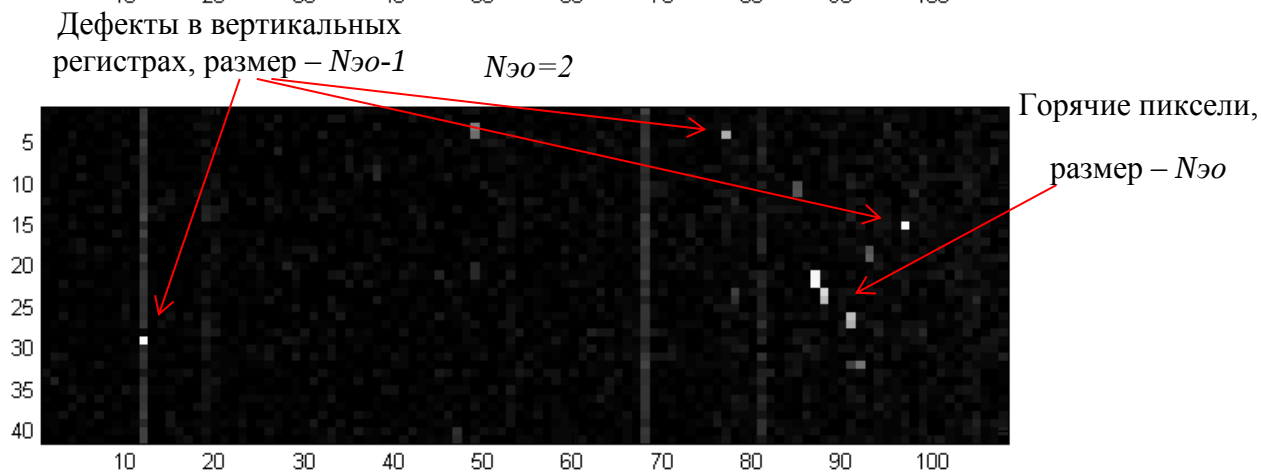
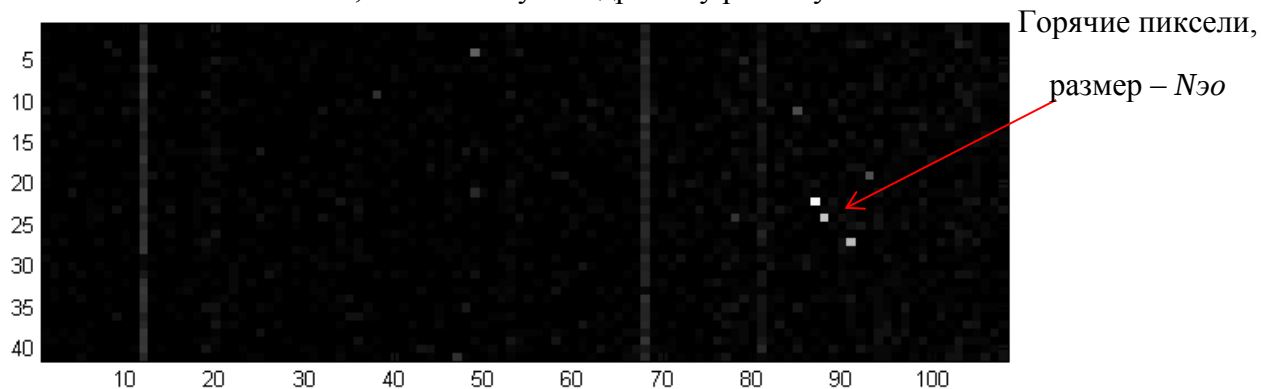


Рисунок 4.9. Изображение при различных значениях $N_{\text{ЭО}}$. Дефекты в вертикальных регистрах появляются только при $N_{\text{ЭО}}=2$.

Поэтому, если в ФПУ присутствует дефект в виде центра повышенной генерации в фотодиоде, то результатом будет светлая линия с длиной, равной

количеству шагов накопления ($N_{\text{ЭО}}$). А в случае, если центр повышенной генерации присутствует в вертикальном регистре, то он проявляется в виде вертикального отрезка пикселей длины $N_{\text{ЭО}}-1$, так как именно столько переносов заряда происходит в вертикальном регистре. На Рисунке 4.9 показана последовательность кадров для различных значений количества шагов отслеживания ($N_{\text{ЭО}}$). В стандартном кадровом режиме (в отличие от ЭО), количество шагов отслеживания $N_{\text{ЭО}}=1$, длина дефекта фотодиода составит один горячий пиксель, а точечный дефект вертикального регистра пропадёт вовсе.

4.3.1. Дефекты вертикального регистра в режиме ЭО

Анализ карты дефектов вертикального регистра показывает, что центров генерации в одном столбце обычно не превышает одной-две штуки. А интенсивность сигнала зависит от времени хранения зарядового пакета под фазой вертикального регистра. Заметим, что данное время может изменяться от съёмки к съёмке и быть больше времени накопления.

В процессе измерения зависимости (интенсивность локальных дефектов вертикального регистра – тактовое время отслеживания) проводилось усреднение темновых сигналов для особо ярких локальных дефектов вертикального регистра. На Рисунке 4.10 показана экспериментально измеренная зависимость для $N_{\text{ЭО}}=10$, из которой видно, что график проходит через начало координат и аппроксимируется линейным законом с точностью не хуже 1,5 %.

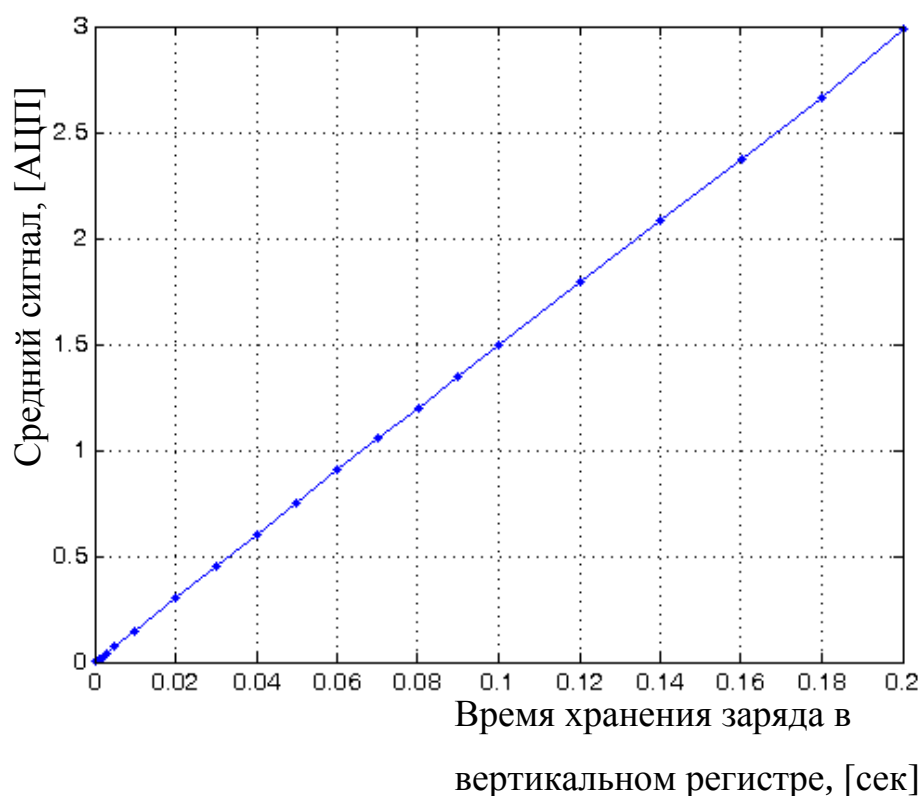


Рисунок 4.10. Зависимость среднего сигнала дефектов вертикального регистра от времени хранения под фазой вертикального регистра

4.3.2. Дефекты фотодиода в режиме ЭО

Дефекты в фотодиодах проявляются в виде горячих пикселей в кадровом режиме или в виде вертикальных отрезков длиной $N_{эо}$ в режиме ЭО.

Интенсивности в каждом пикселе внутри одного отрезка являются равными и зависят от времени накопления. Данная зависимость является линейной, и при нулевом времени накопления темновой сигнал равен нулю. Проведенная аппроксимация показала, что корректировка сигнала для разных времен хранения (накопления) зарядовых пакетов в фотодиоде производится с точностью не хуже 1,5 %. Зависимость сигнала от времени накопления представлена на Рисунке 4.11.

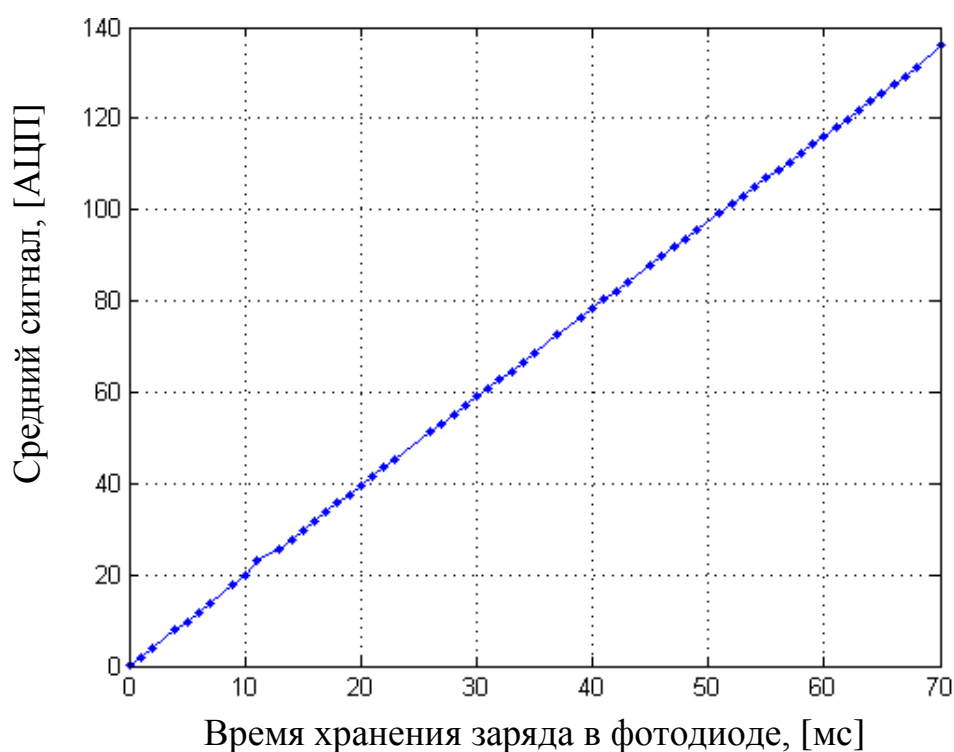


Рисунок 4.11. Зависимость среднего сигнала дефектов фотодиода от времени накопления на каждом шаге ЭО, $N_{ЭО}=10$

4.3.3. Исправление влияния последствий обоих видов радиационных дефектов в режиме ЭО

Для корректного исправления изображения строчно-кадровой матрицы, работающей в режиме ЭО, от влияния радиационных дефектов в работе реализован алгоритм корректировки с учетом критически важных параметров и условий работы ФПУ. А именно, времени накопления на каждом шаге накопления, количества шагов накопления, места генерации темнового тока в фотодиоде и в вертикальном регистре с точностью до пикселя, а также температуры кристалла ФПУ. Введение температурной поправки для дефектов в вертикальном регистре и в фотодиодах соответствует кадровому режиму и было подробно рассмотрено в пункте 4.2 данной работы. При проведении летных испытаний ГСК с КОИ темновые кадры предлагается формировать за счет выключения всех щелей в щелевом устройстве.

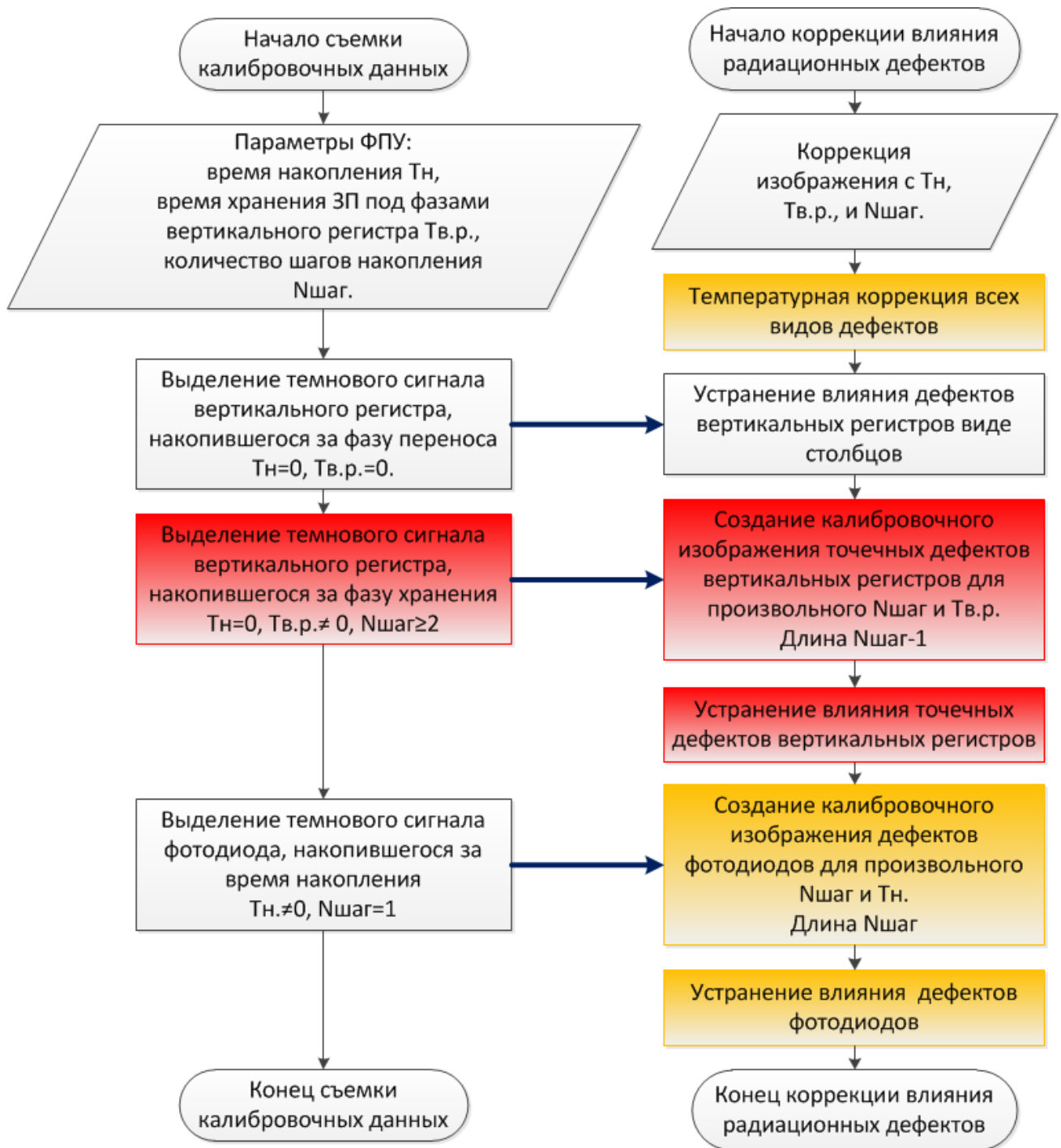


Рисунок 4.12. Структурная схема алгоритма коррекции радиационных дефектов, красным выделены введенные впервые блоки, желтым выделены существенно измененные блоки. $T_{вр}$ – время хранения заряда под фазой вертикального регистра, $N_{шаг}$ – количество шагов накопления.

Алгоритм состоит из двух стадий: первая - съемка калибровочных данных, вторая - непосредственно коррекция изображения. В течение первой стадии

проводится съемка набора кадров с различными параметрами, которые приведены в Таблице 4.1. Далее проводится последовательное выделение темновых сигналов трех типов:

- 1) сигнала вертикального регистра, накопившегося за фазу считывания;
- 2) сигнала вертикального регистра, накопившегося за фазу накопления (хранения);
- 3) сигнала фотодиода, накопившегося за время накопления.

Таблица 4.1. Настройки фотоприемного устройства для съемки калибровочных изображений различных дефектов

Параметр съемки	Время накопления в фотодиоде	Время хранения заряда под фазами вертикального регистра	Количество шагов накопления
Калибровочное изображение			
Темнового сигнала вертикального регистра для фазы считывания (столбец)	0	0	-
Темнового сигнала вертикального регистра для фазы накопления (локальные дефекты)	0	$\neq 0$	≥ 2
Темнового сигнала фотодиода	$\neq 0$	-	1

В случае если время накопления в фотодиоде и под фазами равняется нулю, тогда в темновой кадр вклад дают только сигналы от дефектов вертикальных регистров во время фазы считывания, Рисунок – 4.13а.

Если время накопления в фотодиоде равняется нулю, но присутствует ненулевой период хранения зарядового пакета в вертикальном регистре, тогда

темновой сигнал состоит из суммы сигналов от вертикального регистра, накопившихся за фазы считывания и накопления. Для выделения сигнала, накопившегося за фазу накопления, нужно из рассматриваемого изображения предварительно вычесть темновой сигнал вертикального регистра для фазы считывания, Рисунок – 4.13б.

Для выделения темнового сигнала фотодиода используется кадровый режим съемки с ненулевым временем накопления. Если из такого сигнала вычесть суммарный темновой сигнал вертикального регистра, то будет найден темновой сигнал фотодиода, Рисунок – 4.13в.

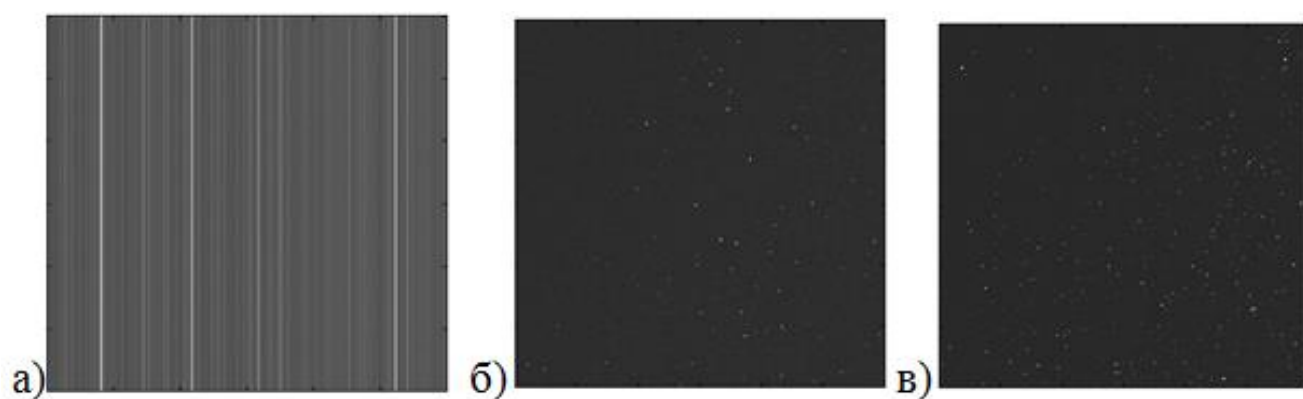


Рисунок 4.13. Темновые сигналы: а) вертикального регистра для фазы считывания, б) вертикального регистра для фазы накопления, в) фотодиода.

Цель второй стадии заключается в исправлении влияние дефектов в информативном изображении. Для этого с помощью функциональных зависимостей описанных в пунктах 4.2.1, 4.2.2, 4.3.1, 4.3.2, изменяются калибровочные изображения дефектов и создаются калибровочные изображения (Рисунок 4.13) для параметров и условий съемки, соответствующих параметрам и условиям съемки информативного кадра. Затем производится последовательное вычитание последствий влияния различных дефектов на изображение. Процесс коррекции тестового темнового кадра показан на Рисунке 4.14.

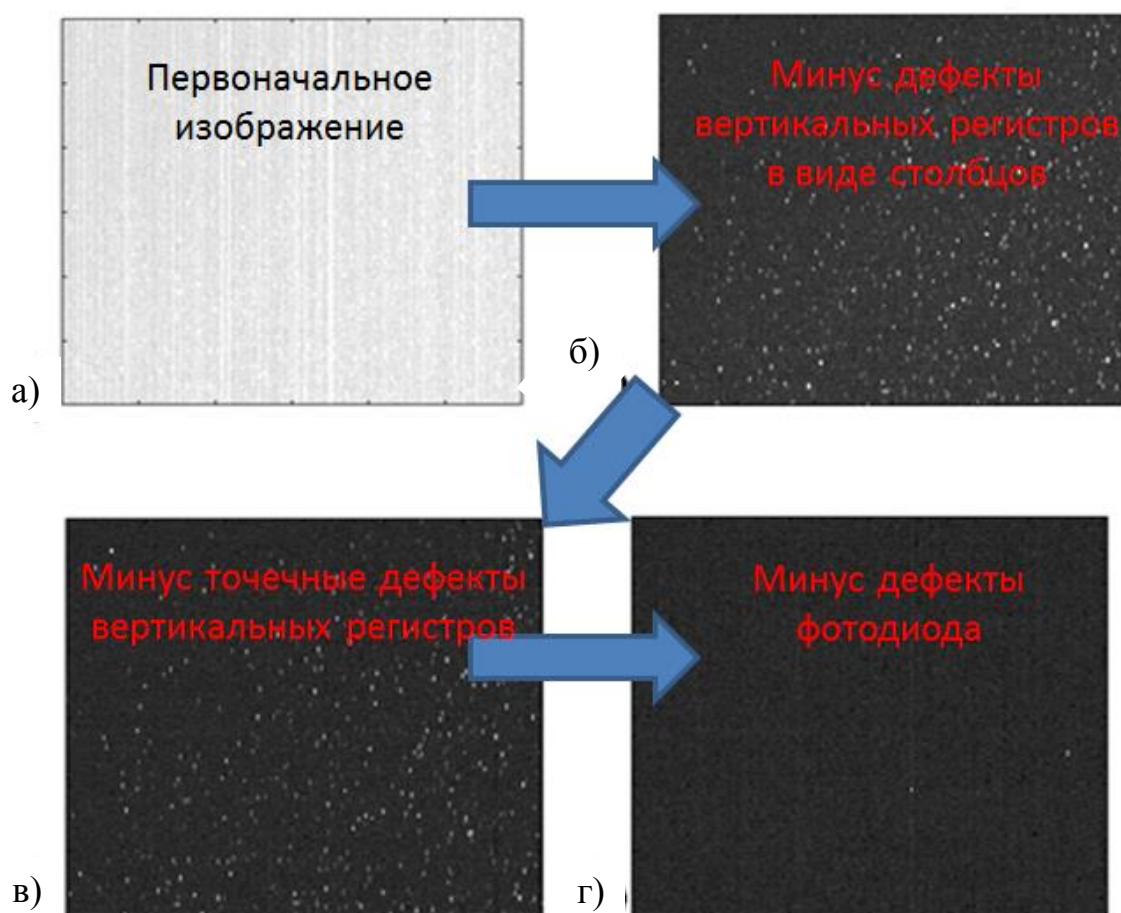


Рисунок 4.14. а) Первоначальное изображение, б) после вычитания темнового сигнала вертикальных регистров для фазы считывания; в) после вычитания темнового сигнала вертикальных регистров; г) после вычитания темновых токов радиационных дефектов фотодиода.

Таким образом, реализован алгоритм коррекции последствий влияния радиационных дефектов на изображение. Температурная коррекция сигналов дефектов позволила уменьшить их влияние более чем в 25 раз, что в 3,5 раза лучше, чем при использовании стандартного подхода. А коррекция сигнала для различных времен накопления и хранения в рабочем диапазоне производится с точностью не хуже 1,5 %.

Выводы по Главе 4

В результате воздействия космической радиации происходит непрерывная деградация отдельных устройств в камерах дистанционного зондирования. С

точки зрения перспектив практического использования космических ГСК с новыми аппаратно-программными конструктивными решениями, важным является вопрос устойчивости к воздействию космической радиации наиболее критичных к такому воздействию элементов ГСК. Для обеспечения режима КОИ ключевыми являются предложенные в работе новые аппаратно-программные решения по щелевому (ЩУ на базе МКМ) и фотоприемному (ФПУ на базе строчно-кадровой ПЗС-матрицы) устройствам ГСК. Существуют добротные исследования, связанные с изучением влияния радиации на характеристики МКМ, которые широко применяются в других приборах космического назначения [76]. Поэтому в главе проведено экспериментальное исследование поведения на предмет устойчивости к воздействию космической радиации включенного в работу комбинированного отслеживания в гиперспектрометре режима ЭО фотоприемника.

В качестве объекта исследования выступала строчно-кадровая ПЗС-матрица фирмы Kodak, KAI-16070. В результате облучения в ФПУ возникают дефекты в виде центров повышенной генерации электронно-дырочных пар в области фотодиода (точечные дефекты) и под фазами вертикального регистра (столбцы с повышенной яркостью), Рисунок 4.1.

При работе строчно-кадровой ПЗС-матрицы в режиме ЭО тактовые диаграммы переноса заряда сформированы таким образом, что под разными фазами вертикального регистра заряд находится разное время. Вследствие этого реализованный режим ЭО позволяет локализовать места, в которых происходит генерация темнового тока в вертикальном регистре с точностью до пикселя. Данный подход к организации движения зарядовых пакетов дает возможность более тщательно анализировать процессы, протекающие в дефектных зонах.

Для корректного исправления последствий воздействия радиационного излучения в работе проведено исследование поведения дефектов для различных параметров функционирования и режимов работы ФПУ. Предложен алгоритм

корректировки температурной зависимости дефектов, который использует изображение двух темновых кадров с различной температурой, например, непосредственно до и сразу после съемки. Этот алгоритм использует функциональную зависимость темнового тока, описывающую положение «глубоких» уровней в запрещенной зоне более точно. За счет уточнения температурной функциональной зависимости сигналов в 3,5 раза повысилась эффективность температурной коррекции по сравнению со стандартной аппроксимацией.

Помимо температурной коррекции этого предложенный алгоритм последовательной корректировки сигнала от дефектов учитывает:

- зависимость от временных параметров (времени накопления на каждом шаге накопления, тактового времени переноса зарядовых пакетов и количества шагов накопления),
- расположение дефектов в фотодиоде и в вертикальном регистре с пиксельной точностью.

Глава 5 Макет многощелевого гиперспектрометра с комбинированным отслеживанием изображения и подтверждение эффективности метода комбинированного отслеживания изображения при решении задачи составления карты концентрации ChlA на базе полученных космических снимков (ГСК МКА-ФКИ)

5.1. Макет ГСК с КОИ

Для подтверждения корректности метода КОИ был разработан исследовательский образец такого гиперспектрометра [86]. На Рисунке 5.1 представлены фотографии исследовательского образца. Камера работает в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (400 нм – 950 нм), ширина спектрального канала для диапазона 400-700 составляет менее 8 нм, а для диапазона 700-950 нм менее 15 нм. Основными техническими элементами ГСК являются:

- 1) входной объектив,
- 2) матрица микрозеркал (многофункциональное щелевое устройство),
- 3) коллимационный объектив,
- 4) призма прямого зрения Амичи (диспергирующий элемент),
- 5) выходной объектив,
- 6) строчно-кадровая ПЗС-матрица, работающая в режиме отслеживания изображения.

Головная программа управления ГСК была написана на языке среды MatLab. Она обращается к каждому из двух электронных модулей: микрозеркальной матрице и фотоприемному устройству и производит управление щелевой структурой и зарядовыми пакетами соответственно. Формирование щелевой маски на матрице микрозеркал производилось также в среде MatLab, а функционирование ФПУ, в том числе и в режиме ЭО, реализовано на языке Verilog в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). В

дальнейшем, при изготовлении летного образца ГСК с КОИ предполагается полная реализация управления ГСК на языке Verilog в ПЛИС.

Помимо этого на языке MatLab написано программное обеспечение обработки данных, которое включает в себя:

- индексирование и сопоставление номера кадра номерам линейных участков,
- индексирование и сопоставление номера строки в кадре номеру щели и спектральному каналу,
- составление из набора линейных проекций непрерывного изображения,
- вычисление из сформированного изображения либо коэффициента энергетической чувствительности, либо величины функции передачи модуляции.

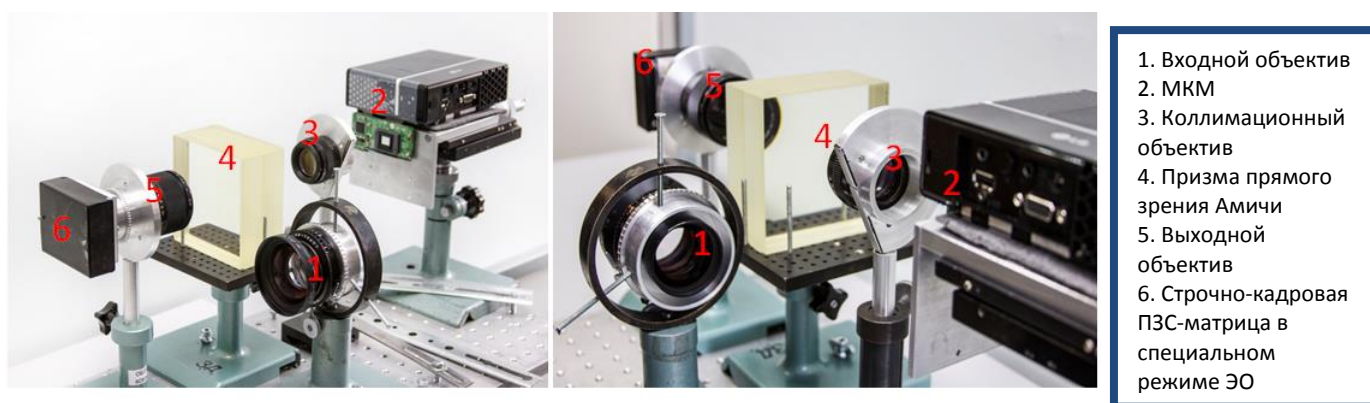


Рисунок 5.1. Фотографии исследовательского образца ГСК с электронным отслеживанием изображения

Рассмотрим отдельные компоненты экспериментального образца гиперпсектрометра с КОИ. Матрица микрозеркал представляет собой матрицу, выполненную по технологии Digital Light Processing (DLP), и каждый элемент в которой это маленькое плоское зеркало, способное поворачиваться вокруг оси на определённый угол с высокой частотой. В зависимости от серии устройства характеристики матрицы различные, так, приведем основные параметры МКМ Texas Instruments для серии DLP9000:

- шаг матрицы микрозеркал 7.56 мкм,

- угол наклона микрозеркал $\pm 12^\circ$,
- общий коэффициент пропускания 0,77,
- частота 15 кГц.

Также стоит отметить, что данные матрицы обладают радиационной стойкостью [76], что необходимо для успешного проведения космических испытаний.

В качестве ФПУ выступала строчно-кадровая ПЗС-матрица КАИ-02050. Алгоритм управления и функционирования ФПУ был реализован на языке Verilog и заложен в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Помимо этого для головной программы управления ГСК реализовано внешнее управление ФПУ из программной среды MatLab. Причем изменение основных параметров возможно непосредственно в процессе съемки. К управляемым параметрам относятся:

- время накопления на каждом шаге отслеживания,
- тактовое время отслеживания или время переноса зарядовых пакетов в вертикальном регистре на следующую строку,
- количество шагов накопления,
- область считывания кадра,
- кадровая частота,
- коэффициент усиления аналогово-цифрового преобразователя.

5.2. Экспериментальное изучение частотной и энергетической характеристик ГСК с КОИ, итоговая частотная сигнально-шумовая характеристика

Измерение общей частотной характеристики отношения сигнал/шум в контексте лабораторной имитации космического эксперимента позволяет определить эффективность подхода КОИ. Важной особенностью космической съемки в целом и принципа КОИ в частности является наличие относительного движения исследуемого объекта и камеры. С целью проверки КОИ был собран

стенд, состоящий из имитатора бега местности, тест-объекта, источника света и оптического антивибрационного стола «Standa». А также к общей программе работы ГСК, написанной в MatLab, был добавлен дополнительный модуль управления имитатором бега местности. Модуль управления позволял перемещать объект с равномерной скоростью на заданное расстояние. На Рисунке 5.2 показана установка для измерения характеристик ГСК с КОИ.

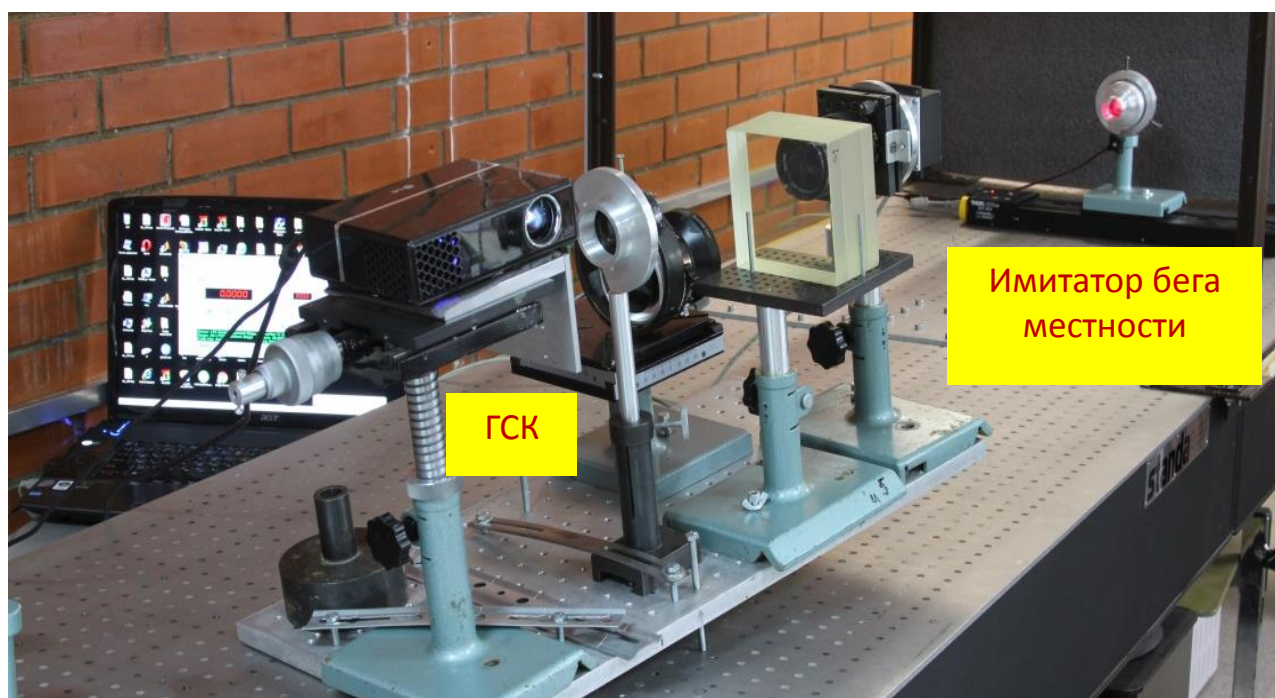


Рисунок 5.2. Фотография установки для измерения частотной и энергетической характеристики ГСК с КОИ

На стенде проводились съемки тест-объекта, пятишпальной миры, при разном количестве задействованных щелей. На Рисунке 5.3 показаны изображения пятишпальной миры, на снимках явно видно увеличение энергетической чувствительности камеры без видимого ухудшения качества изображения. Для численного определения изменения итоговой характеристики $SNR(\nu)$ было проведено:

- измерение ФПМ ГСК для набора пространственных частот,
- измерение отношения сигнал/шум,

- с учетом коэффициента отражения МКМ проведено вычисление коэффициента увеличения итоговой частотной сигнально-шумовой характеристики с КОИ и без КОИ.

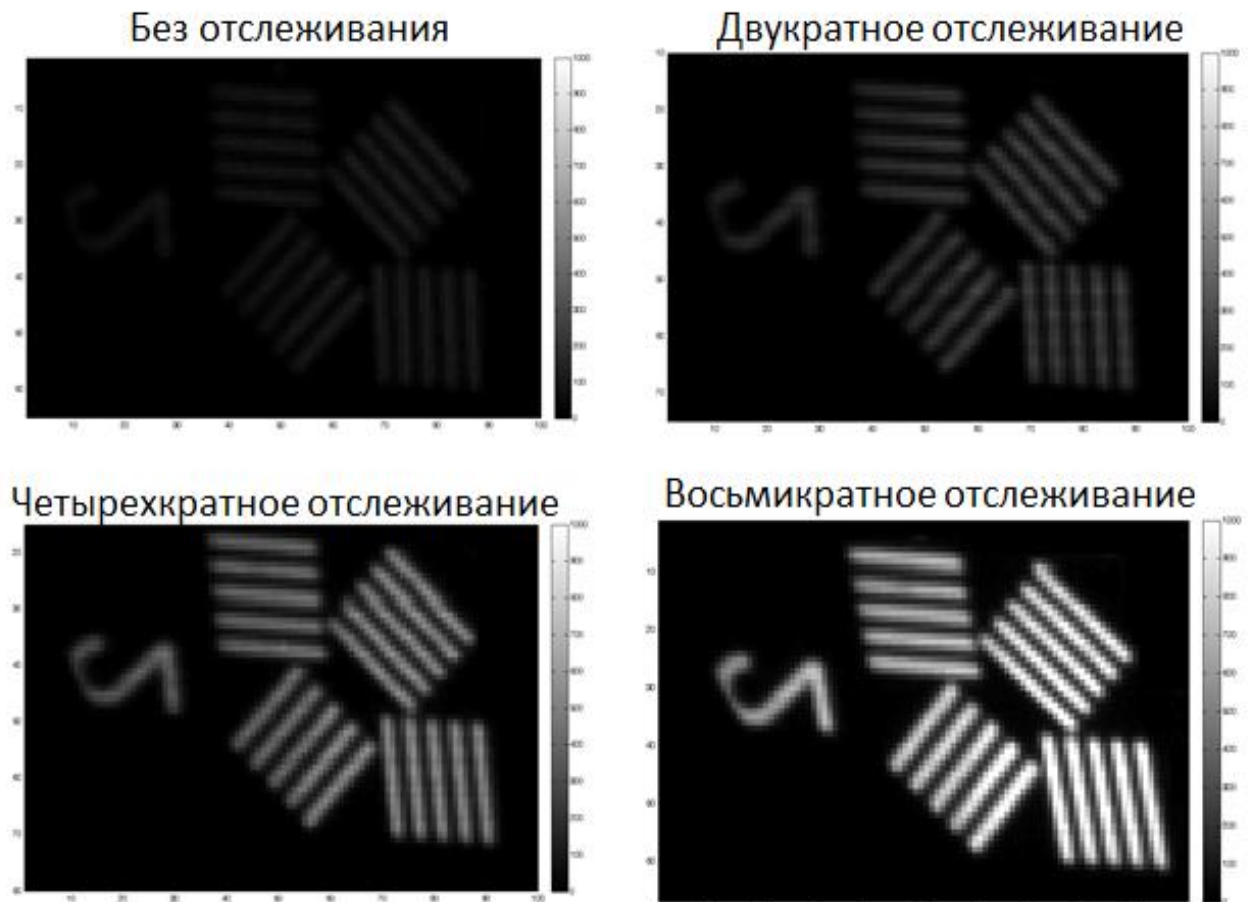


Рисунок 5.3. Увеличение величины сигнала для различных параметров работы КОИ ГСК

ФПМ, которое вносит только режим КОИ (без привязки к ФПМ системы в целом), корректно определять через измерение общей ФПМ с режимом КОИ и общей ФПМ без режима КОИ. Единственным важным условием является измерение этих двух характеристик для одного оптико-электронного тракта, то есть, чтобы все другие частотные искажения были одинаковыми. Причем в соответствии с принципом суперпозиции (пункт 1.3.2):

$$\Phi ПМ_{общ,N} = \Phi ПМ_{общ,1} \cdot \Phi ПМ_{КОИ,N}$$

или:

$$\Phi PM_{КОИ,N} = \frac{\Phi PM_{общ,N}}{\Phi PM_{общ,1}}, \quad (5.1)$$

где N – количество щелей в методе КОИ,

$\Phi PM_{общ,1}$ – общая функция передачи модуляции однощелевой ГСК без КОИ,

$\Phi PM_{общ,N}$ – общая функция передачи модуляции N-щелевой ГСК с КОИ,

$\Phi PM_{КОИ,N}$ – функция передачи модуляции режима КОИ с N количеством щелей.

В процессе измерения ФПМ производилась съемка и обработка изображения длинной периодической решетки с прямоугольным законом распределения коэффициента пропускания и скважностью 2. Методика нахождения ФПМ описана в пункте 1.3.3.

Результаты измерения функции передачи модуляции для разного количества щелей представлены на Рисунке 5.4. Значение ФПМ для макета ГСК лежит немного ниже значения для стандартной ГСК, для рабочих значений частот 0,5-0,8 частоты Найквиста, понижение составило 25% и менее. Основная причина понижения данной характеристики состоит в недостаточной синхронизации перемещений щелевой структуры (ЩС) в МКМ и ЗП в ПЗС-матрице, рассогласование будет устранено за счет введения дополнительного кварцевого генератора на этапе проектирования и изготовления летного образца. Тем не менее, далее итоговая частотная сигнально-шумовая характеристика определяется исходя из реальных на сегодняшний день значений ФПМ.

В качестве расширенного показателя эффективности функционирования камеры выступает (пункт 1.3):

$$SNR(\nu) = SNR(\nu = 0) \cdot \prod_{j=1}^M \Phi PM_{ГСК,j}(\nu), \quad (5.2)$$

где $\prod_{j=1}^M \Phi_{ПМ_{ГСК,j}}(\nu)$ – общая функция передачи модуляции камеры, в которую дают вклад: объектив, единичный элемент ФПУ, звено «смаза», звено «рассогласования» (в режиме отслеживания)

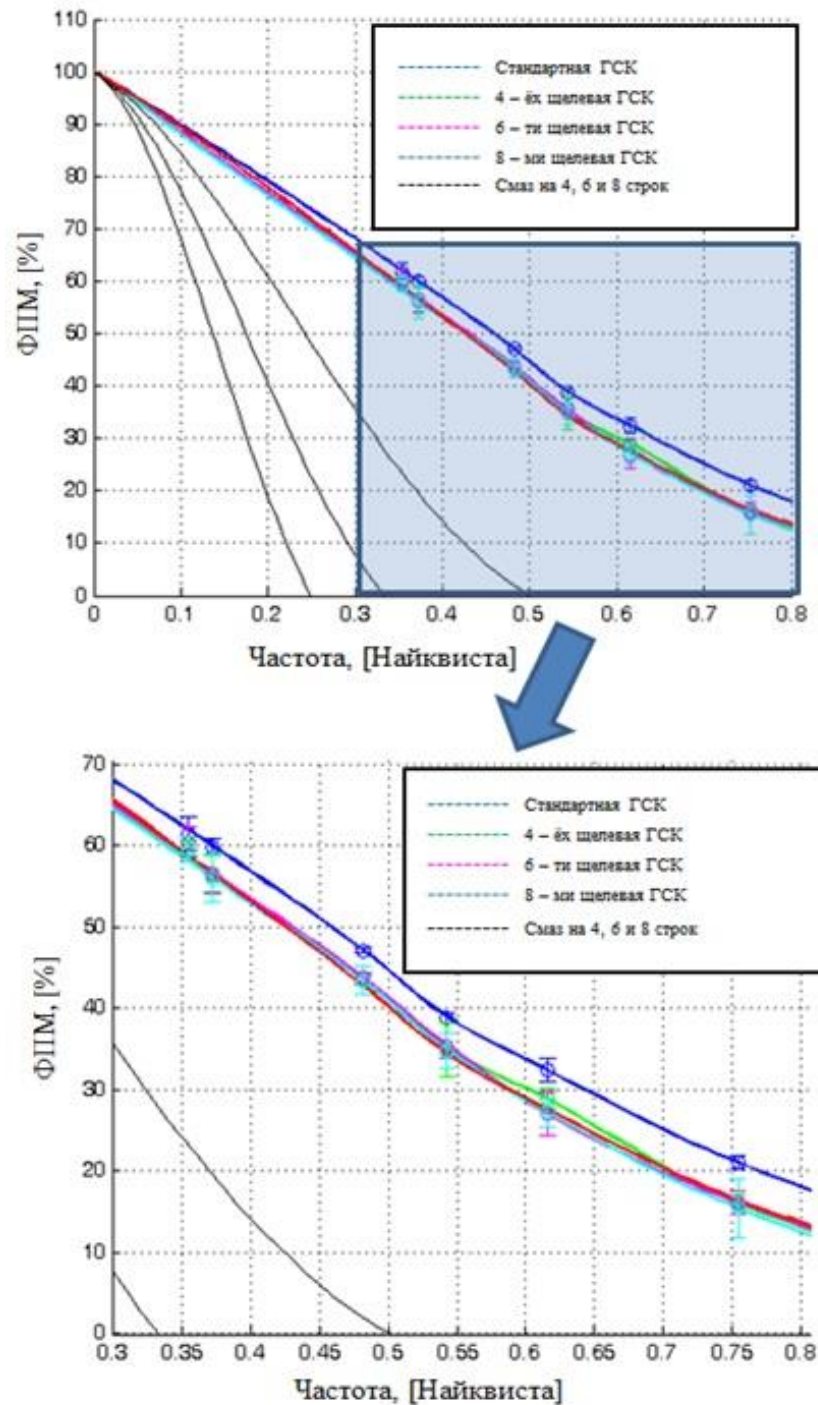


Рисунок 5.4. Частотные характеристики исследовательского образца ГСК с комбинированным отслеживанием изображения

Изменение частотной сигнально-шумовой характеристики (исходя из уравнений (1.2), (1.3), (2.15)) определяется в соответствии с формулой:

$$\frac{SNR_{N-щелевой}(\nu)}{SNR_{1-щелевой}(\nu)} = \frac{SNR_{N-щелевой}(0) \cdot \Phi PM_{N-щелевой}(\nu)}{SNR_{1-щелевой}(0) \cdot \Phi PM_{1-щелевой}(\nu)} = \sqrt{N_{щелей} \cdot \frac{K_{N-щелевой}}{K_{1-щелевой}} \cdot \frac{\Phi PM_{общ,N}(\nu)}{\Phi PM_{общ,1}(\nu)}}, \quad (5.3)$$

где $SNR_{N-щелевой}(\nu), SNR_{1-щелевой}(\nu)$ - частотная сигнально-шумовая характеристика многощелевой и стандартной ГСК,

$SNR_{N-щелевой}(0), SNR_{1-щелевой}(0)$ - сигнально-шумовая характеристика на нулевой пространственной частоте многощелевой и стандартной ГСК,

$N_{щелей}$ - количество щелей,

$K_{N-щелевой}, K_{1-щелевой}$ - интегральные коэффициенты пропускания многощелевой и стандартной ОС,

$\Phi PM_{общ,N}(\nu), \Phi PM_{общ,1}(\nu)$ - функция передачи модуляции многощелевой и однощелевой ГСК.

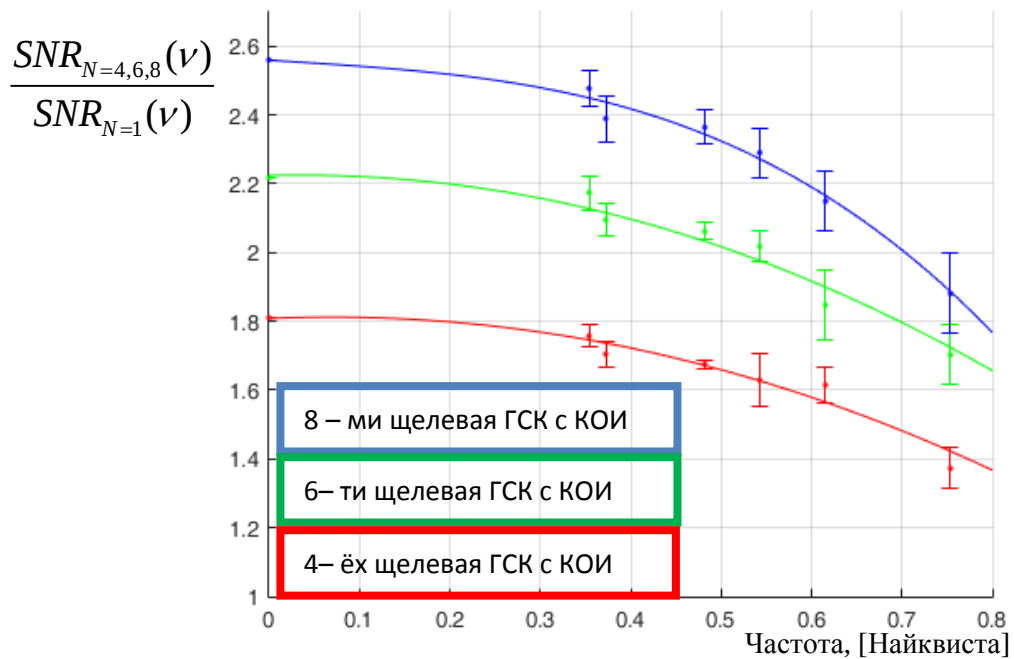


Рисунок 5.5. Увеличение частотно-сигнальной характеристики ГСК с КОИ по сравнению со стандартной ГСК

На Рисунке 5.5 показано увеличение частотной сигнально-шумовой характеристики при использовании механизма КОИ по сравнению со стандартной ГСК. Так, для 4-х щелевой схемы на частоте 0,7 Найквиста произошло увеличение характеристики в 1,48 раза, для 6-ти щелевой схемы в 1,8 раза, а для 8-ми щелевой схемы более чем в 2 раза.

5.3. Модельный расчет оптической схемы ГСК с КОИ для проведения космического эксперимента

Оптическую схему ГСК идеологически удобно разделять на два блока: входной и спектральный. Назначение входного блока состоит в проецировании изображения объекта на щелевое устройство. А назначение спектрального блока состоит в спектральном расщеплении светового излучения, прошедшего ЩУ, и его проецировании на плоскость ФПУ.

Использование в качестве щелевого устройства матрицы микрозеркал накладывает дополнительные ограничения на ОС. В этом случае щелевая структура работает на отражение, а так как входной и спектральный блоки физически располагаются в разных местах, поэтому по крайней мере один из блоков должен обладать наклонной фокальной плоскостью. Помимо этого, оптическая схема должна качественно проецировать изображение не от одной, а от нескольких щелей, то есть входной и спектральный блоки должны обладать повышенным значением рабочего углового поля поперек вектора скорости полёта. Ниже представлена разработанная в программной среде Zemax оптическая схема для гиперспектральной камеры с методом КОИ, предназначенная для космического использования, и удовлетворяющая указанным требованиям.

Входной блок

Одна из самых перспективных и в последнее время широко применяемых схем в космическом приборостроении является трёхзеркальная схема Кука [87]. Основными достоинствами такой схемы является отсутствие экранирования и

небольшая глубина асферизации составляющих зеркал. Отличие, привнесенное в данной работе, состоит в использовании внеосевой нестандартной зеркальной схемы Кука. В рассчитанной оптической схеме Кука поверхности всех трех зеркал являются асферическими второго порядка. Для таких поверхностей асферика является осесимметричной. А наклонная фокальная плоскость, которая требуется для использования МКМ, реализована за счет расположения рабочих апертур поверхностей вне их асферических осей, что позволяет организовать наклонную фокальную плоскость, Рисунок 5.6.

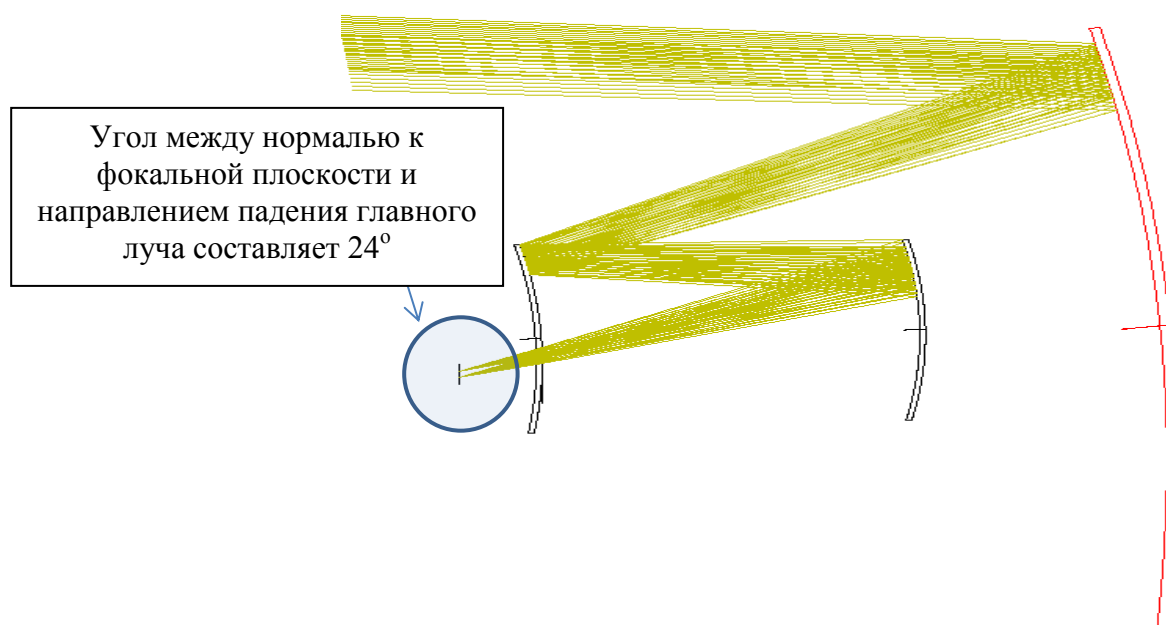


Рисунок 5.6. Входной блок: внеосевая трёхзеркальная схема Кука с наклонной фокальной плоскостью

Спектральный блок

В качестве спектрального блока была выбрана схема проекционного трехзеркального объектива с двумя призмами Фери [88]. В 2001 году был запущен Compact High Resolution Imaging Spectrometer (CHRIS) спектрометр [89], в котором именно по этой оптической схеме был выполнен спектральный блок. К преимуществам такого проекционного объектива можно отнести малые массогабаритные характеристики, небольшие величины хроматических aberrаций и высокий коэффициент пропускания ОС. Помимо этого входной и спектральный

блоки обладают повышенным значением угла поля зрения вдоль вектора скорости полета.

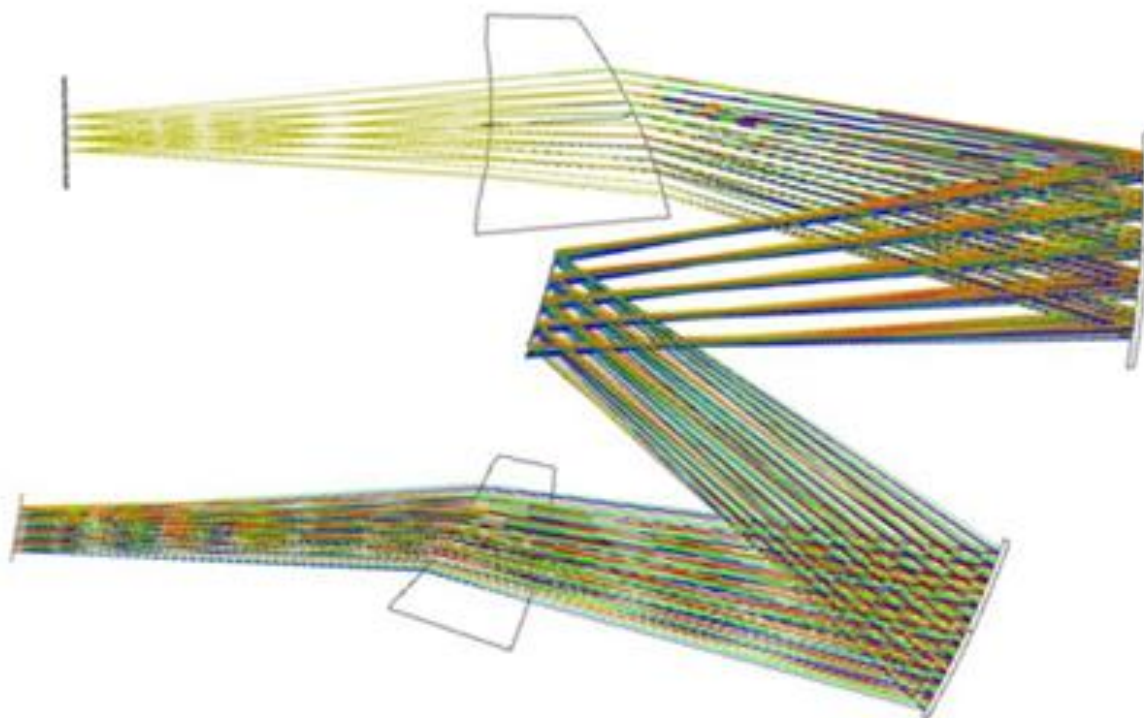


Рисунок 5.7. Спектральный блок: проекционная трёхзеркальная схема с двумя призмами Фери

Тактико-технические характеристики модели ГСК с КОИ для космического эксперимента

Для проведения космического эксперимента был произведен модельный расчёт оптической схемы и адаптированы существующие схемы объективов. Ниже приведены основные характеристики рассчитанной ОС ГСК для космического назначения:

- Пространственное разрешение – 15 м (на высоте 400 км)
- Спектральное разрешение – $2\div 9$ нм
- Спектральный диапазон – 400-1000 нм
- Захват – 23 км (на высоте 400 км)

- Угол поля зрения – 3.2°
- Количество используемых щелей – 4

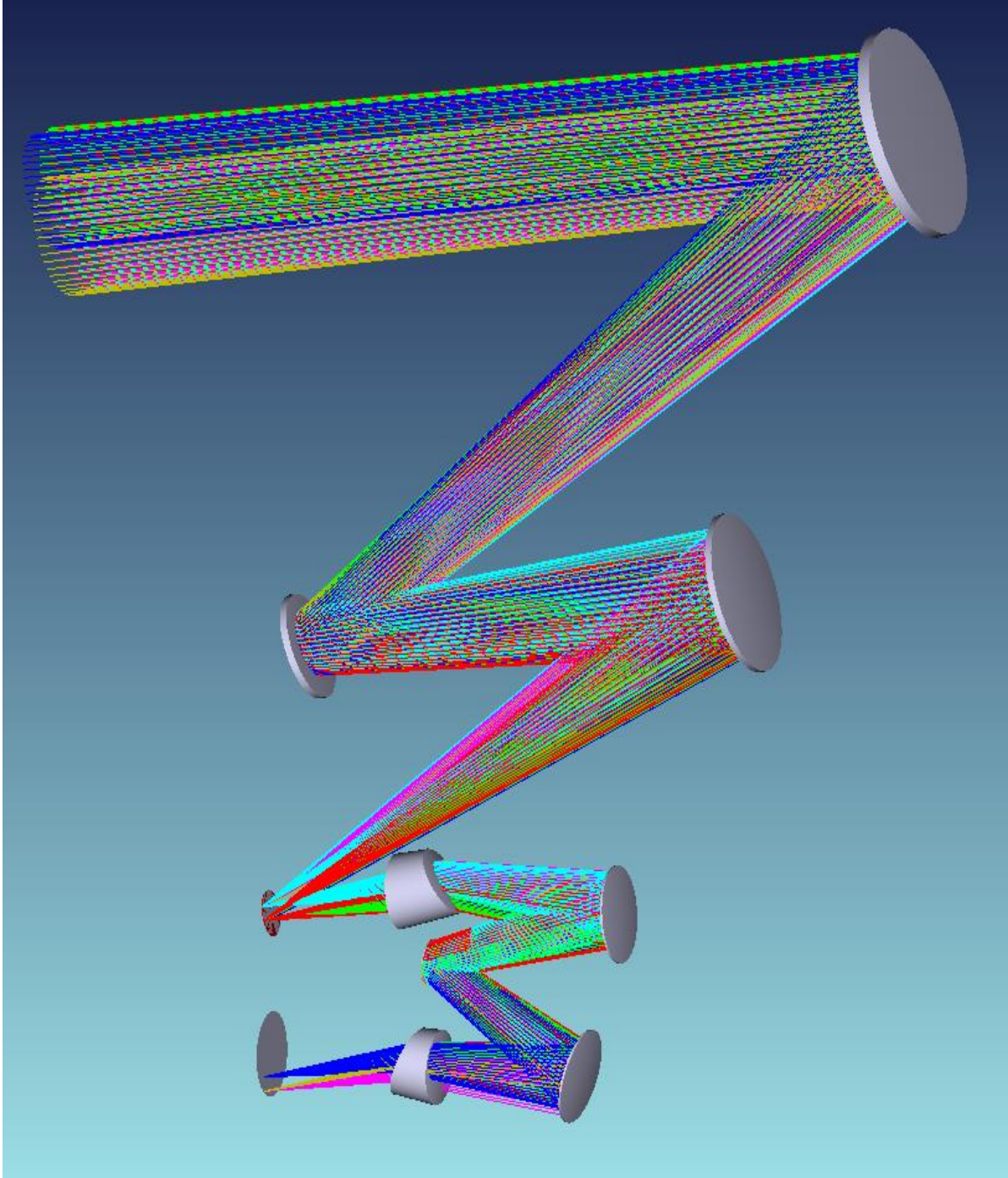


Рисунок 5.8. Общая модель ОС ГСК с КОИ, предназначенная для проведения космического эксперимента. Входной блок – внеосевая схема Кука с наклонной фокальной плоскостью, спектральный блок – проекционный зеркальный объектив с двумя призмами Фери.

Оптимизация оптической схемы гиперспектральной камеры с КОИ выполнена по критерию максимальных значений частотной характеристики ФПМ в рабочем диапазоне длин волн и пространственных частот. За счет использования механизмов глобального и локального поиска оптимальных конструктивных соотношений ОС удалось значительно понизить величину aberrаций [90] и достичь значений ФПМ, превышающих 0,36. Для сравнения, в *ГСК Hyperion (США)* значение ФПМ составляло 0,25 [91].

Таблица 5.1. Функция передачи модуляции на частоте Найквиста для различных длин волн

Длина волны, нм	ФПМ не менее
400	0,36
600	0,46
800	0,46
1000	0,44

5.4. Подтверждение важности метода КОИ при решении задачи составления карты концентрации хлорофилла-А

Назначение метода комбинированного отслеживания изображения заключается в увеличении отношения сигнал/шум, поэтому данный пункт работы демонстрирует эффективность повышения этой характеристики при составлении карты концентрации хлорофилла-А. Причем величина увеличения отношения сигнал/шум соответствует полученным ранее данным для макета ГСК с КОИ.

Важным условием проведения верификации является подтверждение в контексте космической съемки. Это является важным, в виду следующих особенностей:

- тактико-технические характеристики ГСК спроектированы и реализованы для космического использования (основные: общий фокус оптической схемы

ГСК, фокус входного объектива ГСК, светосила оптической схемы ГСК, размер элемента ФПУ),

- определенны временные и частотные параметры съемки (время пролета изображением одной проекции щели и соответствующая кадровая частота ФПУ ГСК),

- необходимо учитывать влияние атмосферы,

- космической съемке соответствуют характерные свето-сигнальные характеристики, связанные с облученности объектов на Земной поверхности, углом Солнца и углом визирования.

В связи с вышесказанным подтверждение эффективности КОИ было проведено на базе обработке реальных космических снимков ГСК МКА-ФКИ ПН1, что позволило проверить действенность метода в условиях космического наблюдения.

5.4.1 Гиперспектральная аппаратура космического базирования (МКА-ФКИ ПН1)

22 июля 2012 года с космодрома Байконур был запущен и выведен на орбиту (ССО – 820 км) экспериментальный исследовательский малый космический аппарат МКА-ФКИ ПН1 (второе название КА «Зонд-ПП»). Космический аппарат МКА-ФКИ ПН1 был разработан и изготовлен в ФГУП «НПО им. С.А.Лавочкина» и управление аппаратом велось с ЦУПа НПО им. С.А.Лавочкина [92].

На МКА-ФКИ ПН1 была установлена дополнительная полезная нагрузка - экспериментальная целевая аппаратура. В состав аппаратуры входила первая российская гиперспектральная камера (ГСК), которая была разработана и изготовлена в АО «НПО «Лептон» при непосредственном участии соискателя.

ГСК была построена по щелевой схеме, а спектральное разложение было реализовано на базе призмного диспергирующего элемента. ГСК снимала Землю в

149 каналах в спектральной полосе 400 – 1000 нм с пространственным разрешением 52 м.

5.4.2. Алгоритм вычисления концентрации ChlA

При обработке спектральных изображений водных объектов необходимо учитывать важную особенность: вследствие низкой отражательной способности водного объекта (не более 10 – 15 % [9] [10]), действительная сигнально-шумовая характеристика гораздо ниже приведенной для стандартных, благоприятных параметров объекта, указанных в спецификации к гиперспектрометрам (обычно зачетный объект наблюдения обладает коэффициентом отражения от 30 – 100 %). Что в конечном итоге из-за присутствующего фотонного шума и собственного шума электронного устройства приводит к высоким ошибкам в определении концентрации оптических параметров водного объекта. Поэтому крайне важной в оптико-электронной аппаратуре наблюдения является характеристика $SNR(\nu = 0)$, отвечающая за энергетические и шумовые свойства прибора.

Существующие алгоритмы оценки физико-химических параметров объектов на подстилающей поверхности основываются на уменьшении количества используемых данных. Так эффективным подходом к уменьшению данных является их переопределение, например, методом главных компонент [93].

В то же время не теряют актуальность стандартные методы оценки, основывающиеся на показаниях коэффициента отражения всего в нескольких 2-3 каналах R_x , где x – центральная длина волны спектрального канала. Для оценки эффективности использования подхода комбинированного отслеживания такие методы вычисления концентраций является достаточными.

В работе [94] показано, что алгоритмы определения концентрации, основанные на анализе каналов в ближнем инфракрасном диапазоне являются более эффективными, чем алгоритмы, использующие зеленую и синюю области спектра. Двухканальный алгоритм вычисления приведен в [21] [14] [95] [96] [97]

[98], при этом концентрация хлорофилла-А определяется в соответствии с формулой:

$$Chla = A \cdot \frac{R_{708}}{R_{665}} + B, \quad (5.4)$$

Где A и B определяют регрессионную модель и равняются 79,324 и -50,674 соответственно, R_{708} (R_{665}) – спектральные коэффициенты отражения для длин волн 708 нм и 665 нм.

Пусть значение полезного сигнала, выраженное в количестве электронов, в канале с $\lambda_1 = 708$ нм составляет S_1 , а в канале $\lambda_2 = 665$ нм составляет S_2 . Тогда значение концентрации хлорофилла-А равно:

$$Chla = A \cdot \frac{\left(\frac{B_{708}}{E_{s,708} \cdot K_{a,708}} \right)}{\left(\frac{B_{665}}{E_{s,665} \cdot K_{a,665}} \right)} + B, \quad (5.5)$$

где B_{708} и B_{665} - значение энергетической яркости от объекта для $\lambda_1 = 708$ и $\lambda_2 = 665$,

$E_{s,708}$ и $E_{s,665}$ - значение солнечной освещенности объекта для $\lambda_1 = 708$ и $\lambda_2 = 665$,

$K_{a,708}$ и $K_{a,665}$ - значение коэффициента пропускания атмосферы для $\lambda_1 = 708$ и $\lambda_2 = 665$.

Основным источником шумов при расчете вегетационных индексов является фотонный шум, вызванный как световым излучением пришедшим от исследуемой среды, так и от внешней и посторонней засветки [21]. Также вклад в ошибку вносят собственные шумы фотоприемника и шум квантования. Общий сигнал является суммой сигнала от исследуемого объекта и дымки атмосферы.

Пусть S_{708} и S_{665} - значение сигнала от объекта в электронах для каналов с $\lambda_1 = 708$ и $\lambda_2 = 665$,

F_{708} и F_{665} - значение сигнала от дымки в электронах для каналов с $\lambda_1 = 708$ и $\lambda_2 = 665$,

$\sigma_{ph} = \sqrt{S + F}$ - фотонный шум,

$\sigma_{э.м.}$ - собственный шум фотоприемного устройства,

$\sigma_{кв}$ - шум квантования.

Относительная ошибка измерения коэффициента отражения объекта для длины волны λ_1 :

$$\frac{\Delta R_{708}}{R_{708}} = \frac{\sqrt{S_{708} + F_{708} + \sigma_{э.м.}^2 + \sigma_{кв}^2}}{S_{708}}, \quad (5.6)$$

а для λ_2 :

$$\frac{\Delta R_{665}}{R_{665}} = \frac{\sqrt{S_{665} + F_{665} + \sigma_{э.м.}^2 + \sigma_{кв}^2}}{S_{665}}, \quad (5.7)$$

Общая ошибка измерения составляет:

$$\left(\frac{\Delta Chla}{Chla} \right)_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{708}}{R_{708}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{665}}{R_{665}} \right)^2}, \quad (5.8)$$

$$\left(\frac{\Delta Chla}{Chla} \right)_1 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{S_{708} + F_{708} + \sigma_{э.м.}^2 + \sigma_{кв}^2}}{S_{708}} \right)^2 + \left(\frac{\sqrt{S_{665} + F_{665} + \sigma_{э.м.}^2 + \sigma_{кв}^2}}{S_{665}} \right)^2}, \quad (5.9)$$

Работа метода КОИ была смоделирована за счет увеличения отношения сигнал/шум в космических снимках ГСК. Увеличение сигнал/шум производилось в два раза, что соответствует макету ГСК с КОИ функционирующей с 8-ю щелями. Увеличение характеристики сигнал/шум моделировалось пространственной суммацией пикселей в изображениях. Далее проводилось сравнение результатов вычисления концентрации ChlA для двух значений сигнал/шум. Относительная ошибка для увеличенного значения сигнал/шум составляет:

$$\left(\frac{\Delta Chla}{Chla}\right)_2 = \sqrt{\left(\frac{\sqrt{4 \cdot (S_{708} + F_{708}) + 4 \cdot \sigma_{э.м.}^2 + 4 \cdot \sigma_{кв}^2}}{4 \cdot S_{708}}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{4 \cdot (S_{665} + F_{665}) + 4 \cdot \sigma_{э.м.}^2 + 4 \cdot \sigma_{кв}^2}}{4 \cdot S_{665}}\right)^2}, \quad (5.10)$$

или

$$\left(\frac{\Delta Chla}{Chla}\right)_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta Chla}{Chla}\right)_1, \quad (5.11)$$

5.4.3. Результаты вычисления ChlA для базового и увеличенного значения характеристики отношения сигнала к шуму

Гиперспектральной камерой было проведено несколько съемок и произведен ряд экспериментов по тематической обработке космических гиперспектральных изображений. Ниже представлен результат обработки изображения участка территории в восточной Индии в районе водохранилища Сомасила на реке Пена. Данный участок был снят 22.09.2012 г.

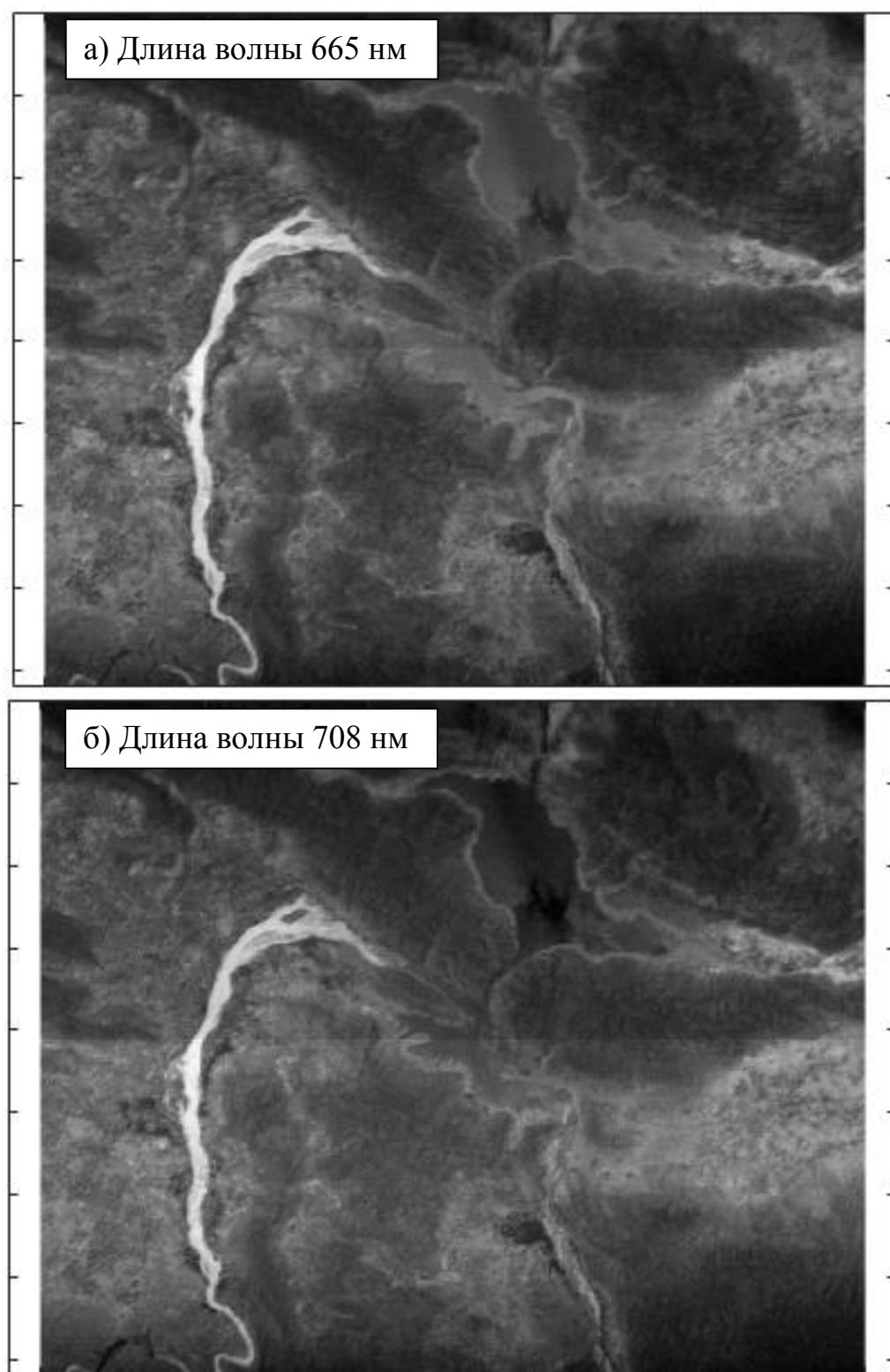


Рисунок 5.9. Изображение участка водохранилища Сомасила в двух спектральных каналах

На Рисунке 5.9 приведены исходные данные съемки, а на Рисунках 5.10, 5.11, 5.12 результаты обработки данных участка водохранилища Сомасила и

прилегающих к водохранилищу водных объектов. Показаны только водные объекты: водохранилище, реки, подсыхающий участок речного русла.

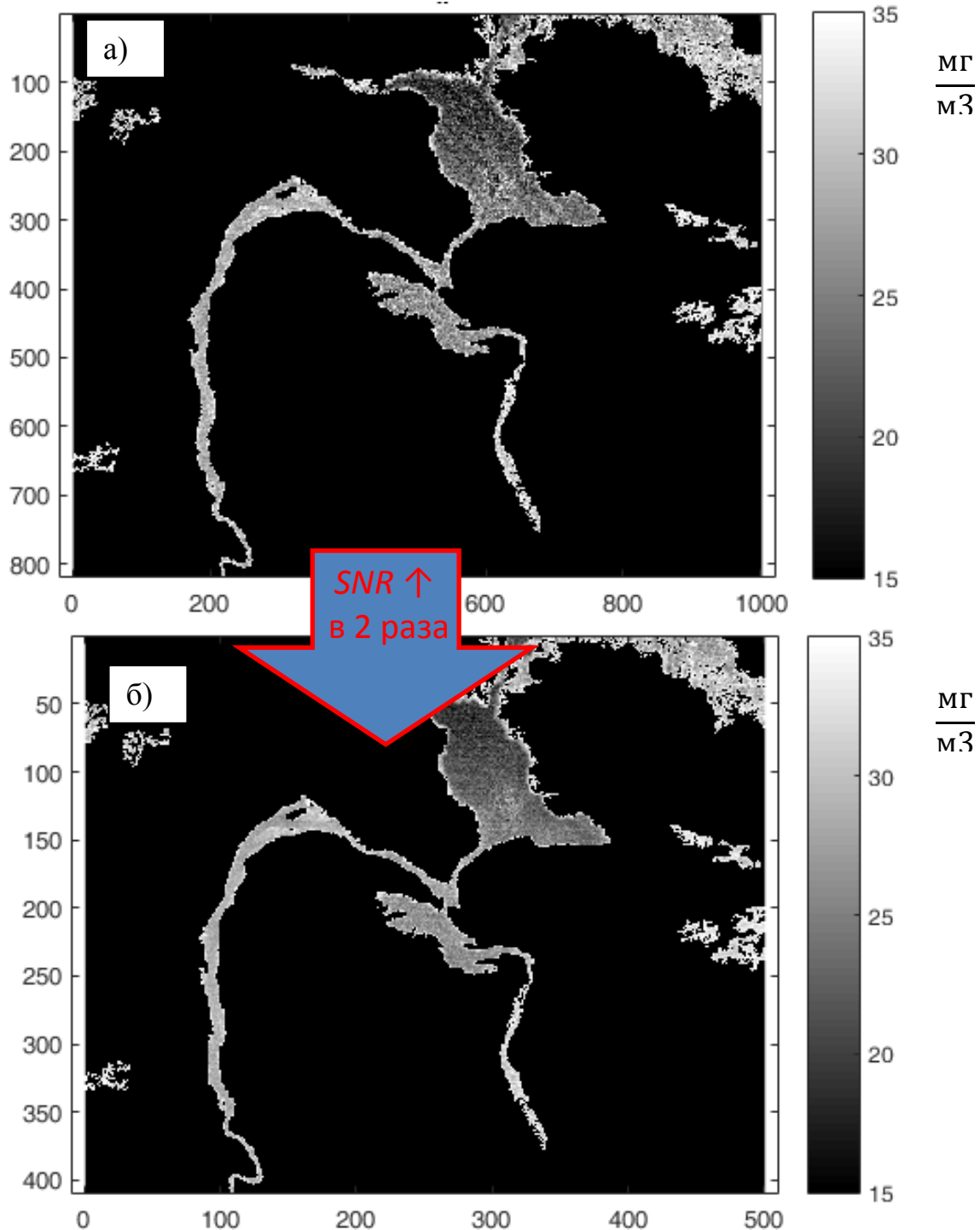


Рисунок 5.10. Концентрация хлорофилла-А территории водохранилища Сомасила (а – при штатном значении сигнал/шум, б - при увеличенном значении сигнал/шум)

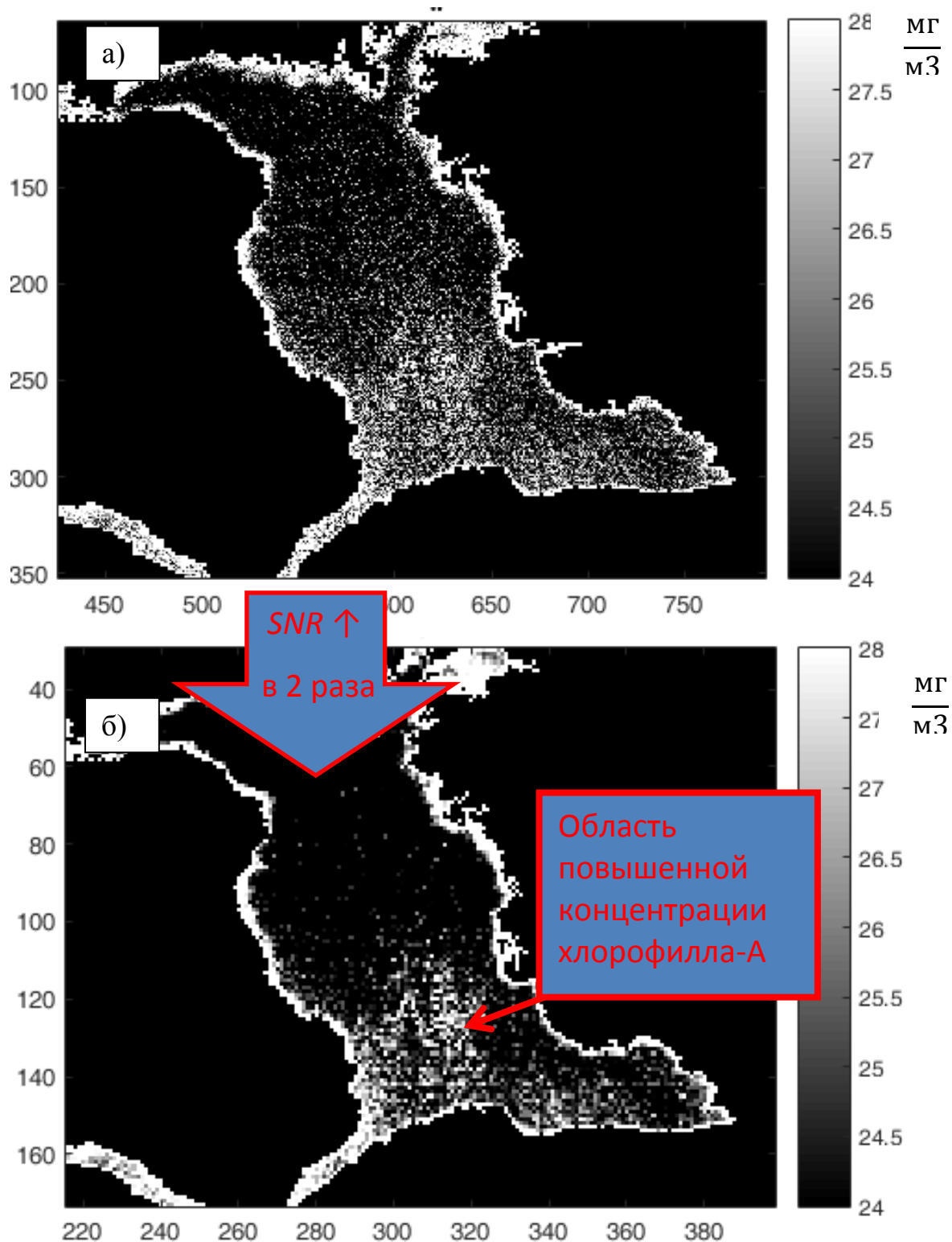


Рисунок 5.11. Концентрация хлорофилла-А территории водохранилища Сомасила с увеличением (а – при штатном значении сигнал/шум, б - при увеличенном значении сигнал/шум)

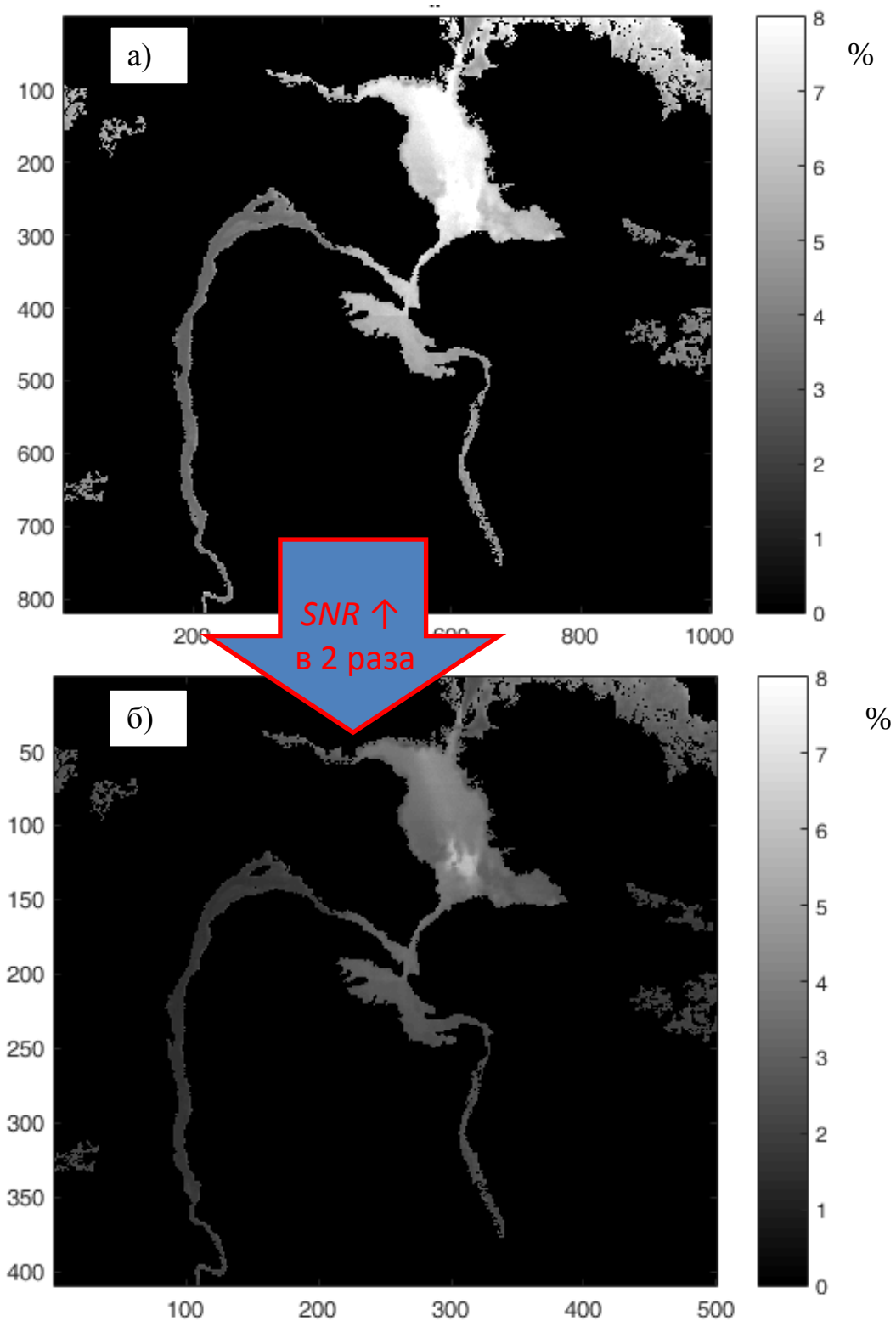


Рисунок 5.12. Ошибка определения концентрации хлорофилла А (а – при штатном значении сигнал/шум, б - при увеличенном значении сигнал/шум)

Значение концентрации хлорофилла-А на отдалении от береговой линии изменяется от 24 до 28 мг/м³ (Рисунок 5.11), или контраст объекта составляет 0,08. При обработке базовых изображений величина относительной ошибка определения концентрации достигает 5-8% или 1,5-2 мг/м³. После обработки спектральных изображений с повышенным значением величины сигнал/шум (Рисунок 5.11. б) шумовая составляющая определения концентрации в среднем снизилась в 2 раза (до 0,75-1 мг/м³).

Выводы по Главе 5

На исследовательском образце ГСК с КОИ были измерены частотные и энергетические характеристики прибора. Итоговая частотная сигнально-шумовая характеристика для 4-х щелевой схемы на частоте 0,7 Найквиста увеличилась в 1,48 раза, для 6-ти щелевой схемы в 1,8 раза, а для 8-ми щелевой схемы более чем в 2 раза.

Для проведения космического эксперимента была рассчитана оптическая схема такой ГСК. В качестве прототипа входного объектива использовалась трёхзеркальная схема Кука, модернизированная в данной работе. Отличие от стандартной схемы состоит в использовании внеосевой зеркальной схемы, за счет которой формировалось наклонное поле зрения. Спектральное разложение осуществлялось проекционным зеркальным объективом с двумя призмами Фери.

Данные оптические схемы были адаптированы для функционирования в режиме КОИ. А именно, было увеличено угловое поле зрения поперек расположения щелей. Минимальное значение частотной характеристики ФПМ составило 0,36, что на 44% выше соответствующей величины ФПМ в ГСК *Hyperion* [91]. Такое значение удалось достигнуть за счет использования механизмов глобального и локального поиска оптимальных конструктивных соотношений оптической схемы.

Проведённый анализ и обработка космических снимков (проект ГСК МКА-ФКИ) с целью выявления мест повышенной концентрации хлорофилла-А и

составление его карты показал, что низкая сигнально-шумовая характеристика является основным ограничивающим фактором исследования прибрежных аквасистем. В свою очередь, показано, что использование метода КОИ позволит снизить шумовую составляющую с $1,5-2 \text{ мг/м}^3$ до $0,75-1 \text{ мг/м}^3$. Или для характерного значения перепада концентрации по площади акватории в 4 мг/м^3 , отношение сигнал/шум увеличилось с 2,3 до 4,5 единиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационной работы были получены следующие основные практические и научные результаты.

1. Предложен расширенный параметр эффективности работы для ГСК космического базирования, учитывающий стандартную характеристику отношение сигнала к шуму и дополнительно частотно-пространственную рассогласованность прибора.

2. Разработан новый метод КОИ обеспечивающий существенное увеличение энергетической чувствительности.

3. Разработан алгоритм управления режима работы ФПУ, позволяющий проводить отслеживание изображения без возникновения дополнительных частотных искажений, также при этом максимальная зарядовая ёмкость ФПУ увеличилась с 23 до 46 тыс. электронов.

4. Разработан программный модуль обработки данных в нестандартном режиме работы ФПУ. Эффективность температурной корректировки сигналов радиационных дефектов увеличилась в 3,5 раза. Нестандартная организация тактирования импульсов перемещения зарядовых пакетов позволила локализовать дефекты вертикального регистра с точностью до одного пикселя.

5. Разработан макет ГСК с КОИ который обладает повышенным до 2-ух раз значением частотной сигнально-шумовой характеристики по сравнению с стандартной ГСК.

6. Проведены анализ и обработка космических снимков (проект ГСК МКА-ФКИ) с целью выявления влияния повышения сигнально шумовой характеристики на точность определения концентрации хлорофилла-А. Показано, что при увеличении сигнально-шумовой характеристики, в количество раз соответствующих использованию метода КОИ, ошибка понижается с 1,5-2 мг/м³ до 0,75-1 мг/м³.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

ВЗН – временная задержка и накопление

ГСК – гиперспектральная камера

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

КА – космический аппарат

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

КОИ – комбинированное отслеживание изображения

МКМ – микрозеркальная матрица

МО – механическое отслеживание

ОС – оптическая схема

ОЭА – оптико-электронная аппаратура

ОЭТ – оптико-электронный тракт

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ПП – подстилающая поверхность

ПЧЭХ – пороговая частотно-энергетическая характеристика

СЧЭУ – сквозное частотно-энергетическое уравнение

ФПМ – функция передачи модуляции

ФПУ – фотоприемное устройство

ЧКХ – частотно-контрастная характеристика

ЩС – щелевая структура

ЭО – электронное отслеживание

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. И.М.Левин. Перспективные направления развития оптических дистанционных методов исследования океана // Сборник научных трудов. Санкт-Петербургский научный центр РАН. "Фундаментальная и прикладная гидрофизика". 2008. pp. 14-47.
2. G. Dall'Olmo, A. A. Gitelson, D. C. Rundquist, B. Leavitt, T. Barrow, and J. C. Holz. Assessing the potential of SeaWiFS and MODIS for estimating chlorophyll concentration in turbid productive waters using red and nearinfrared bands // Remote Sens. Environ. 2005.
3. G. Chang, K. Mahoney, A. Briggs-Whitmire, D. D. R. Kohler, C. D. Mobley, M. Lewis, M. A. Moline, E. Boss, M. Kim, W. Philpot, and T. D. Dickey. The new age of hyperspectral oceanography // Oceanography (Wash. D.C.). 2004.
4. M. Sydor, R. W. Gould, R. A. Arnone, V. I. Haltrin, and W. Goode. Uniqueness in remote sensing of the inherent optical properties of ocean water // Appl. Opt.. 2004.
5. P. W. Bissett, R. A. Arnone, C. O. Davis, T. D. Dickey, D. Dye, D. D. R. Kohler, and R. W. Gould. From meters to kilometers - a look at ocean color scales of variability, spatial coherence, and the need for fine scale remote sensing in coastal ocean optics // Oceanography (Wash D.C.). 2004.
6. W. J. Moses, A. A. Gitelson, S. Berdnikov, and V. Povazhnyy. Estimation of chlorophyll-a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data - successes and challenges // Environ. Res. Lett.. 2009.

7. J.Bioucas-Dias, etc. Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges // IEEE Geoscience and remote sensing. June 2013.
8. В.В.Донец, Л.И.Муравский. Особенности применения приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах // Космическая наука и технология. 2012.
9. V. E. Brando and A. G. Dekker. Satellite hyperspectral remote sensing for estimating estuarine and coastal water quality // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2003.
10. J. H. Bowles, S. J. Maness, etc. Hyperspectral imaging of an inter-coastal waterway // Proc. SPIE, Monitoring and Change Detection. 2005.
11. D. R. Korwan, etc. The hyperspectral imager for the coastal ocean (HICO) – design and early results // IGRSS Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing. 2010.
12. Ansley D. A., Cook L. G. Multi-slit spectrometer. 1998. US6122051 A.
13. Valle T., Hardesty C., Davis C., Tufillaro N., Stephens M., Good W., Spuhler P. Multi-Slit Optimized Spectrometer: An Innovative Design for Geostationary Hyperspectral Imaging // Optical Remote Sensing of the Environment. Monterey. 2012.
14. A. Gitelson, D. Gurlin, W. Moses, and T. Barrow. A bio-optical algorithm for the remote estimation of the chlorophyll-a concentration in case 2 waters // Environ. Res. Lett. 2009.

15. Е.Л. Вейдеман, С.А. Черкашин, В.В. Щеглов. Диагностика состояний прибрежных акваторий: некоторые проблемы и результаты // Известия Тихоокеанского научно-исследовательского центра. 2001.
16. Качество воды. ГОСТ раздел ISO 13.060.
17. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. СанПиН 2.1.4.1074-01.
18. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды нецентрализованного водоснабжения. Санитарная охрана источников. СанПиН 2.1.4.1175-02.
19. Горшкова О.М., Пацаева С.В. Флуоресценция растворенного органического вещества природной воды // Вода: химия и экология. ноябрь 2009. pp. 31-37.
20. Chuanmin Hu A.A. Dynamic range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past // APPLIED OPTICS. 2012.
21. Wesley J. Moses A.A. Impact of signal-to-noise ratio in a hyperspectral sensor on the accuracy of biophysical parameter estimation in case II waters // OPTICS EXPRESS. 2012.
22. Kraft S., Del Bollo U., Harnisch B., Bouvet M., Drusch M., Bézy J.-L. Fluorescence Imaging Spectrometer concepts for the Earth Explorer Mission Candidate FLEX // Proceedings of International Conference on Space Optics. 2012.

23. Sellar R. G., Boreman D. G. Classification of imaging spectrometers for remote sensing applications // Optical Engineering. 2004. Vol. 44.
24. Joseph G. Building Earth observation cameras. Taylor & Francis Group, 2015.
25. Губанова Л.А. Градиентные интерференционные системы. Санкт-Петербург: ЛИТМО, 2008. Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук.
26. Квитка В.Е., Ключников М.В., Князев А.Н., Бунтов Г.В. Расчёт параметров гиперспектрометра на основе клинового светофильтра // 57-я научная конференция МФТИ. Москва. 2014.
27. Korableva O., Bertaux J.-L., Grigorieva A., Dimarellis E., Kalinnikov Yu., Rodina A., Muller C., Fonteyne D. An AOTF-based spectrometer for the studies of Mars atmosphere for Mars Express ESA mission // Advances in Space Research. 2002. Vol. 29. No. 2. pp. 143-150.
28. Беляев Д.А. Исследование планетных атмосфер методом солнечного просвечивания с применением акустооптической фильтрации. Москва. 2008. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук.
29. Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические устройства и их применени. Москва: М. Сов. Радио, 1978. 112 pp.
30. Hüni A., Biesemans J., Meuleman K., Dell'Endice F., Schläpfer D., Adriaensen S., Kempenaers S., Odermatt D., Kneubühler M., Nieke J. Structure, Components and Interfaces of the Airborne Prism Experiment (APEX) Processing and Archiving Facility // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2008.

31. Карпеев С.В., Хонина С.Н., Харитонов С.И. Исследование дифракционной решетки на выпуклой поверхности как диспергирующего элемента // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 2.
32. Лансберг Г. С. Оптика. М: Наука, 1976.
33. Бакланов А. И. Системы наблюдения и мониторинга. М: БИНОМ, 2009.
34. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М: Мир, 1978.
35. Бобылёв В.И. Анализ и синтез космических систем мониторинга различных спектральных диапазонов. НИИ КС, 2000. 340 с.
Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук.
36. Сикорский Д.А. Методы оценки показателя информативности оптико-электронного тракта космических систем наблюдения в видимом диапазоне спектра. 2004. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук.
37. Батраков А. С., Анатольев А. Ю. Математическая модель для прогнозирования линейного разрешения космических оптико-электронных систем дистанционного зондирования // Оптический журнал. 2000. Vol. 67. No. 7. P. 92.
38. Тымкул В.М., Тымкул Л.В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. Новосибирск: СГГА, 2005. 215 с.
39. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения. М: Наука, 1988. 475 с.

40. Зуев В. Е., Банах В. А., Покасов В. В. Оптика турбулентной атмосферы. Ленинград: Гидрометиздат, 1988.
41. Сикорский Д.А. Метод оценки уровня турбулентности атмосферы // Электронный журнал "Исследовано в России". 2002. С. 824-838.
42. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику. М: Мир, 1970.
43. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику. М: Мир, 1966.
44. Изнар А.Н., Павлов А.В., Федоров Б.Ф. Оптико-электронные приборы космических аппаратов. М: Машиностроение, 1972. 368 с.
45. Попов В.И. Системы ориентации и стабилизации космических аппаратов. 2-е изд. Машиностроение, 1986. 184 с.
46. Hiroshi T. Apparatus for automatically measuring the characteristics of an optical system. 1980. US4410268 A.
47. Kiyoharu M., Kazuo M., Kenji Y., Tsunemi G., Hideo M. Apparatus for measuring optical characteristics of optical systems. 1983. US4641964 A.
48. Tatian B. System utilizing an achromatic null lens for correcting aberrations in a spherical wavefront. 1989. US4958931 A.
49. Koichi M., Syun'itirou W., Makoto I. Method and apparatus for measuring lens performance. 1991. US5335059 A.
50. Tetsuo S., Minoru Y. Aberration measuring method. 1982. US4641962 A.
51. Hellmuth T., Campbell C. E., Jay W. Measurement of lens characteristics. 1994. US5469261 A.

52. Borodovsky Y. Lens characterization apparatus and method. 1986. US4767215 A.
53. Lapornik F. E. Apparatus and method for measuring the vertex power of an optical system. 1977. 4139305.
54. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М: Машиностроение, 1987.
55. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М: Мир, 1971.
56. Шульманс М. Я. Измерения передаточных функций оптических систем. Ленинград: Машиностроение, 1980.
57. Креопалова Г. В., Пуряев Д. Т. Исследование и контроль оптических систем. М: Машиностроение, 1978.
58. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Ленинград: Машиностроение, 1983.
59. Князьков П.А. Алгоритмы и технологии высокоточной оценки разрешающей способности космических систем наблюдения Земли в процессе их эксплуатации. Рязань. 2010. Диссертация на соискание ученой степени кандидата наук.
60. Катус Г.П. Обработка визуальной информации. М: Машиностроение, 1990. 320 с.
61. Мишин В.П. Механика космического полета. М: Машиностроение, 1989. 401 с.
62. Мартинес Ф. Синтез изображений. Машиностроение, 1989. 401 с.

63. Сикорский Д.А. Метод оценки пороговой частотно-энергетической характеристики оптико-электронного тракта // Электронный журнал "Исследовано в России". 2003. № 112.
64. Лазовский Л. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир. Санкт-Петербург. 2010. 24 с.
65. Smith W. S., Boyle G. E. Charge Coupled Semiconductor Devices // Technical Journal. 1970. pp. 587-593.
66. Holst G. C. CCD Arrays, Cameras, and Displays. W: SPIE Optical Engineering Press, 1998.
67. Shcherbina O. A., Shcherbina G. A., Manceau M., Vezzoli S., Carbone L., Vittorio M., Bramati A., Giacobino E., Chekhova M. V., Leuchs G. Photon correlations for colloidal nanocrystals and their clusters // Optics Letters. April 2014.
68. Kim C. K., Early J. M., Amelio G. F. Buried channel charge coupled devices // Proc. Northeast Reg. Eng. Meeting. 1972. pp. 161 -164.
69. Walden R. Buried channel charge coupled apparatus. 1973. US3852799 A.
70. Ostman B. TDI CCDs are still the sensors of choice for demanding applications. Laser Focus World, 2010.
71. Wong H. S., Yao Y. L., Schlig E. S. TDI charge-coupled devices: Design and applications // IBM Journal of Research and Development. 1992.
72. Бакланов А. И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010.

73. Щербина Г.А. Реализация режима ВЗН на базе строчно-кадровой ПЗС матрицы // Журнал Радиоэлектроники. 2014. № 6.
74. KAI-08050 Device Performance Specification 2012. URL: http://www.ccd.com/pdf/ccd_8050.pdf (дата обращения: 3.3.2016).
75. Lee P.P.K., Thompson D.A., Modney D.L. Total ionizing dose gamma and proton radiation testing on a COTS interline CCD with microlens // IEEE Transaction on Nuclear Science. 2006.
76. Fourspring K. D.; Ninkov Z.; Fodness B. C.; Robberto M.; Heap S.; Kim A. G. Proton radiation testing of digital micromirror devices for space applications // Optical Engineering. 2013.
77. Панасюк М.И., Новиков Л.С. Модель космоса. М-КДУ, 2007.
78. Marshall P. W., Cheryl J. Radiation Damage Mechanisms in CCD Imagers. STScI Workshop on HST CCD Detector CTE, 2000.
79. Hopkinson, G. R.; Mohammadzadeh, A. Comparison of CCD damage due to 10- and 60-MeV protons 2003.
80. Щербина Г.А. Влияние воздействия высокоэнергетичных протонов на работоспособность строчно-кадровой ПЗС матрицы, работающей в кадровом режиме и в режиме временной задержки и накопления // Журнал Радиоэлектроники. 2015. No. 4.
81. KAI-16070 2015. URL: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/KAI-16070-D.PDF (дата обращения: 3.3.2016).

82. Ермаков К.Н., Иванов Н.А., Лобанов О.В., Пашук В.В., Тверской М.Г., Любинский С.М. Экспериментальное исследование воздействия протонов на приборы с зарядовой связью // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. № 13.
83. CCD Image Sensor 2016. URL: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/AND9189-D.PDF (дата обращения: 3.3.2016).
84. Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М: Наука, 1963. 496 с.
85. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М: Наука, 1990.
86. Щербина Г.А. Щ.М.В. Многоцелевая гиперспектральная камера с комбинированным отслеживанием изображения, 2624622, 2016.
87. Cook L.G. Reflective optical triplet having a real entrance pupil. 1986. US4733955 A.
88. Reinhold B., Delclaud Y., Cerutti-Maori G., Labandibar J.Y. Spectral apparatus of the concentric type having a fery prism. 1995. US5781290 A.
89. Cutter M. A., Lobb D. R. A novel hyperspectral imaging system for small satellites // Recent Advances in Space Technologies. 2003.
90. Селиверстова Е.В., Щербина Г.А., Шурыгин Б.М. Алгоритм нахождения абберрационных коэффициентов в космической оптико-электронной аппаратуре наблюдения // Журнал радиоэлектроники. 2017.

91. Pearlman J., Segal C., et al. IEEE Aerospace Conference // The EO-1 Hyperion Imaging Spectrometer. 2001.
92. Пресс-службы Роскосмоса и НПО им. С.А.Лавочкина. Завершаются лётные испытания МКА ФКИ «Зонд-ПП» 2012. URL: <http://www.roscosmos.ru/19152/>
93. C. Rodarmel, J. Shan. Principal Component Analysis for Hyperspectral Image Classification // Surveying and Land Information Science. 2002.
94. Gilerson A.A. Algorithms for remote estimation of chlorophyll-a in coastal and inland waters using red and near infrared bands 2010.
95. Moses W.J. Satellite-based estimation of chlorophyll-a concentration in turbid productive waters. 209. PhD dissertation, University of Nebraska-Lincoln.
96. A. Gitelson, D. Gurlin, W. Moses, and Y. Yacobi. Remote estimation of chlorophyll-a concentration in inland, estuarine, and coastal waters // Advances in Environmental Remote Sensing: Sensors, Algorithms, and Applications. 2011.
97. A. A. Gitelson, G. Dall'Olmo, W. Moses, D. C. Rundquist, T. Barrow, T. R. Fisher, D. Gurlin, and J. Holz. A simple semi-analytical model for remote estimation of chlorophyll-a in turbid waters: validation // Remote Sens. Environ. 2008.
98. W. Moses, A. Gitelson, S. Berdnikov, and V. Povazhnyy. Satellite estimation of chlorophyll-a concentration using the red and NIR bands of MERIS - the Azov Sea case study // IEEE Geosci. Remote Sens. Lett. 2009.