

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



Квитка Василий Егорович

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЕТЕКТОРА МОЛНИЙ
КОСМИЧЕСКОГО БАЗИРОВАНИЯ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Клюшников Максим Владимирович, к.т.н.

Долгопрудный, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ МОЛНИЙ ИЗ КОСМОСА.....	10
1.1. Физическая модель наблюдения молнии из космоса.....	10
1.2. Обзор существующих детекторов молний.....	21
1.2.1 Низкоорбитальные системы.....	21
1.2.2 Геостационарные системы.....	26
1.3. Направления совершенствования низкоорбитальных систем.....	30
ГЛАВА 2. ОБЛИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА.....	31
2.1. Обоснование необходимых характеристик детектора молний.....	31
2.1.1 Размер проекции пикселя.....	31
2.1.2 Размер снимка.....	32
2.1.3 Кадровая частота и время накопления.....	33
2.1.4 Разрядность АЦП фотоприёмника.....	34
2.1.5 Необходимость бинирования пикселей.....	35
2.1.6 Вероятность обнаружения отблеска.....	36
2.2. Исследование возможных схем построения.....	36
2.2.1 Классическая схема.....	36
2.2.2 Схема с расширителем пучка.....	38
2.2.3 Двухканальная схема.....	39
2.3. Исследование требуемых характеристик фотоприёмника.....	41
2.3.1. Общие требования к фотоприёмнику.....	41
2.3.2 Обзор КМОП-фотоприёмников.....	42
2.3.3. Реализация гибкости характеристик ПАК ДМ при использовании КМОП-фотоприёмников.....	43
2.3.4 Выводы по анализу фотоприёмников.....	45
2.4. Исследование влияния фотоприёмника.....	46
2.4.1. Функция передачи модуляции.....	46
2.5. Исследование параметров светофильтра.....	47
2.5.1 Определение ширины полосы пропускания.....	47
2.5.2 Диаметр светофильтра.....	51
2.5.3 Анализ падения пропускания светофильтра на краях кадра.....	55
2.6. Исследование параметров объектива.....	57
2.6.1 Определение относительного отверстия.....	57
2.6.2 Определение необходимого соотношения сигнал/шум.....	63
2.6.3 Сводная таблица характеристик.....	72
2.6.4 Выводы.....	72
2.7. Влияние оптического тракта.....	73
2.7.1 Функция передачи модуляции.....	73
2.7.2 Виньетирование.....	79
2.8 Конструктивно-технологические решения.....	80
2.8.1 Оценка массогабаритных характеристик объектива.....	80
2.8.2 Оптико-электронный преобразователь.....	83
Выводы по главе 2.....	83

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ.....	84
3.1 Распределение этапов обработки снимков между оптическим блоком, блоком обработки и наземными системами.....	84
3.2 Алгоритм обработки снимков.....	85
3.2.1 Последовательность проверки пикселя по критериям обнаружения отблеска.....	85
3.2.2 Блок-схема алгоритма.....	89
3.3 Уточнение временной привязки.....	93
3.4 Методы вычисления фактического фона.....	95
3.4.1 Усреднение.....	95
3.4.2 Скользящее среднее.....	95
3.4.3 Промежуточные суммы.....	96
3.4.4 Медианное значение.....	96
3.5 Определение количества усредняемых снимков при вычислении фактического фона.....	97
3.6 Оценка вероятности обнаружения молнии.....	99
3.7 Оценка выходных информационных потоков.....	102
Выводы по главе 3.....	104
ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАКЕТИРОВАНИЕ ПАК ДМ.....	105
4.1 Моделирование снимков с отблесками.....	105
4.2 Экспериментальное определение необходимого порога в алгоритме.....	107
4.3 Оценка требуемой производительности бортового вычислителя.....	112
4.4 Макетирование ПАК ДМ.....	113
4.4.1 Макетирование камеры.....	113
4.4.2 Описание макета.....	113
4.4.3 Последовательность испытаний.....	117
4.4.4 Полученные результаты.....	118
Выводы по главе 4.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	120
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ.....	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

Проблема регулярного наблюдения активности молний в земной атмосфере в последние годы вызывает широкий интерес как с точки зрения развития наук в области физики атмосферы [1] так и в прикладных аспектах [2].

Накопление статистических данных о вспышках позволяет уточнять климатические модели и повышать точность прогнозирования погоды [1]. Изучение географического распределения грозовой активности даёт возможность совершенствования моделей крупномасштабных атмосферных явлений, так как интенсивность молний и динамика развития циклонов взаимосвязаны [3]. Так, увеличение активности молний в центре циклона может свидетельствовать о скором увеличении его интенсивности [3]. Кроме создания основы для более точных моделей циклонов данные от оптического датчика молний позволят глубже исследовать процессы образования озона в атмосфере [4], [5].

Молнии являются ключевым элементом глобальной электрической цепи (ГЭЦ), поддерживающей относительно постоянную разность потенциалов между Землёй и верхними слоями атмосферы [6]. Изучение ГЭЦ важно не только для климатологии [7], но и для физики ионосферы. Как разряды «облако-облако», так и разряды «облако-Земля» оказывают влияние на электрический потенциал ионосферы [8]. В свою очередь, электрический потенциал ионосферы взаимосвязан с радиоактивным загрязнением атмосферы [9], что делает проблему изучения молний важной не только для метеорологии, но и для экологических наблюдений.

На сегодняшний день накоплен обширный опыт эксплуатации наземных систем регистрации молний. Они доказали свою эффективность при выявлении разрядов вида «облако-Земля». Однако, для обнаружения разрядов «облако-облако» применимость наземных систем ограничена [5]. Нужно также отметить, что наземные станции не охватывают значительные площади: океаны, крупные озёра, горные районы. Развитие оптоэлектроники и систем дистанционного

зондирования Земли (ДЗЗ) делает возможным наблюдение молний из космоса в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Космические детекторы молний позволяют повысить качество наблюдения всех видов молний, в особенности «облако-облако». Кроме того, именно космические системы обеспечивают охват всей территории Земли.

С точки зрения применения детектора молний для условий России, целесообразно его размещение на космическом аппарате (КА) с достаточно большим наклоном орбиты. В частности, одним из вариантов базирования является Международная космическая станция (МКС), имеющая наклонение орбиты $51,6^\circ$.

Описанные научные проблемы позволяют сделать вывод об актуальности задачи наблюдения молний средствами ДЗЗ.

Степень разработанности темы

Космические детекторы молний созданы к настоящему времени исследователями США, Китая, Дании и России. Получен опыт их эксплуатации на низкоорбитальных и геостационарных КА. Тем не менее, в данной области космического приборостроения существуют нерешенные или малоизученные проблемы. Среди них следует выделить задачу повышения информативности обнаружения молниевых явлений, которые, как известно, отличаются разнообразием как по физическим проявлениям, так и по географической привязке.

Одним из возможных направлений решения данной проблемы является разработка бортового оптического детектора с ключевыми характеристиками, регулируемые в процессе эксплуатации в соответствии с задаваемыми условиями поиска конкретного молниевых явления. Далее это важнейшее требование будем характеризовать термином «гибкость характеристик».

Отметим, что гибкость характеристик детектора повысит эффективность совместной работы с бортовыми регистраторами других диапазонов спектра. В частности, перспективной является совместная работа оптического детектора

молний и регистратора гамма-излучения [5]. Получаемые данные дадут возможность выявлять гамма-вспышки земного происхождения (TGF) в верхних слоях атмосферы, находящиеся в диапазоне энергий 0,01...10 МэВ [5]. По наиболее распространённой теории, TGF можно наблюдать именно после вспышек «классических» молний [5], [10]. Совмещение информации оптического и гамма-детекторов позволит достичь прогресса в двух нерешённых задачах: составление карты интенсивности TGF в атмосфере Земли и поиск взаимосвязи TGF с характеристиками «классической» молнии [5], [11].

Реализация гибкости характеристик детектора молний осуществима при его исполнении на основе КМОП-фотоприёмника. Переход с приборов с зарядовой связью (ПЗС) на КМОП-фотоприёмники также позволит добиться миниатюризации оптико-электронного преобразователя высокоскоростной камеры, что соответствует современным тенденциям космического приборостроения [12], [13].

Анализ разработанности проблемы показал, что имеет место целесообразность создания Программно-аппаратного комплекса детектора молний космического базирования (ПАК ДМ), обладающего гибкими характеристиками и выполненного на основе КМОП-фотоприёмника.

Цель работы

Определение облика и программно-алгоритмических решений для низкоорбитального космического комплекса регистрации молний ПАК ДМ с гибкими характеристиками.

Задачи работы

- 1) Обоснование физической модели наблюдения молний из космоса средствами ДЗЗ;
- 2) Определение облика ПАК ДМ и основных параметров его составных частей, обеспечивающих гибкость характеристик комплекса;

- 3) Разработка критериев обнаружения молний с учётом модели наблюдения. Реализация на их основе автоматической обработки изображений, получаемых ПАК ДМ;
- 4) Верификация рассчитанных характеристик ПАК ДМ путём его моделирования и макетирования.

Научная новизна работы

- 1) Впервые в отечественном ДЗЗ определён облик построенного на основе КМОП-фотоприёмника детектора молний, обладающего гибкими ключевыми характеристиками: полосой захвата, кадровой частотой и пространственным разрешением;
- 2) Разработан и отмакетирован алгоритм автоматического обнаружения молний на изображениях, получаемых ПАК ДМ;
- 3) Создано программно-методическое обеспечение моделирования изображений, получаемых ПАК ДМ во всех режимах работы и условиях съёмки;
- 4) Предложен и опробован способ макетирования ПАК ДМ, учитывающий особенности облика прибора и программно-методических решений.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы были использованы:

- 1) В Филиале АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС» при выполнении эскизного проекта детектора молний для космического эксперимента «Конвергенция». Комплекс научной аппаратуры создаётся для МКС совместно с ИКИ РАН.
- 2) В Филиале АО «РКЦ «Прогресс» - НПП «ОПТЭКС» при выполнении предпроектных работ и формировании технических предложений по созданию перспективного детектора молний для геостационарного КА «Электро-М»;
- 3) В учебном процессе МФТИ, зимняя школа бакалавров «Абсолютное будущее - 2018».

Методология и методы исследования

В работе были использованы методы фотометрических расчётов, математического и численного моделирования, обработки информации, макетирования оптико-электронных систем.

Положения, выносимые на защиту

- 1) Обоснование целевых характеристик ПАК ДМ с учётом сформированной модели наблюдения молнии средствами ДЗЗ;
- 2) Облик оптико-электронного блока детектора молний на основе КМОП-фотоприёмника;
- 3) Критерии обнаружения отблесков молний и основанный на них алгоритм обработки снимков в автоматическом режиме;
- 4) Методическое обеспечение моделирования и макетирования детектора молний с гибкими характеристиками.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов подтверждается:

- 1) Согласованностью характеристик ПАК ДМ, полученных в результате расчётно-теоретического анализа, с имеющимися открытыми данными об аналогичных системах;
- 2) Удовлетворительным совпадением результатов компьютерного моделирования, результатов макетирования и обоснованных характеристик ПАК ДМ;
- 3) Апробацией и обсуждением работы на конференциях и семинарах

Основные проблемы и результаты работы обсуждались на следующих конференциях:

- 1) 60-я научная конференция МФТИ (2017)
- 2) Пятнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, Москва, 2017)

- 3) XV научно-техническая конференция
«Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли-2018» (Алушта)
- 4) Шестнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, Москва, 2018)
- 5) 61-я научная конференция МФТИ (2018)
- 6) Первый международный аэрокосмический симпозиум «Шёлковый путь» (МФТИ, 2018)
- 7) Молодёжная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической, авиационной и других ведущих высокотехнологичных отраслях промышленности» (Звёздный городок, 2019)
- 8) Семнадцатая Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (ИКИ РАН, Москва, 2019)
- 9) 62-я научная конференция МФТИ (2019)

Личный вклад автора

Все научные и практические результаты, изложенные в диссертационной работе, были получены лично автором или при его ключевом участии. На использованные в работе заимствованные теоретические положения и практические результаты имеются необходимые библиографические ссылки.

Благодарности

Автор диссертации выражает глубокую благодарность научному руководителю М.В. Ключникову. Соискатель также благодарит д.ф.-м.н, профессора Т.В. Кондранина, руководителей и специалистов НПП «ОПТЭКС» А.И. Бакланова, В.О. Прасолова, А.С. Забиякина, Н.В. Тихонову, В.Д. Блинова, П.Н. Разживалова, А.В. Корха, О.П. Курову за ценные советы и конструктивную критику.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ПРОБЛЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ МОЛНИЙ ИЗ КОСМОСА

1.1. Физическая модель наблюдения молнии из космоса

Одной из основных проблем работы является формирование модели молнии. Анализ зарубежной литературы позволяет сформировать представление о наблюдаемом явлении с точки зрения задач ДЗЗ.

Молния состоит из нескольких импульсов, каждая из которых создает на верхней границе облачности световое пятно, яркость которого по площади можно принять равномерной.

Общий вид внешней границы облачности с пятнами от молний показан на рисунках 1.1 – 1.2.



Рисунок 1.1



Рисунок 1.2

Диаметр отблесков имеет значительный разброс: от 7 до 60 км [14]. В то же время наиболее частыми являются отблески с характерными размерами около 10 км [14], [15], [16].

Следующим моментом является количество импульсов (в англоязычной литературе - pulses), из которых состоит вспышка молнии в целом (flash). По данным [17], распределение молний по количеству импульсов соответствует приведенному на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3. Распределение молний по количеству световых импульсов, описанное в [17]. Видно, что 80% молний имеют не более 15 вспышек, но при этом можно выделить достаточно большой класс (15%) «одноимпульсных» молний.

В докладе [16] приведён пример временной диаграммы молнии из 5 импульсов, показанный на рисунке 1.4.

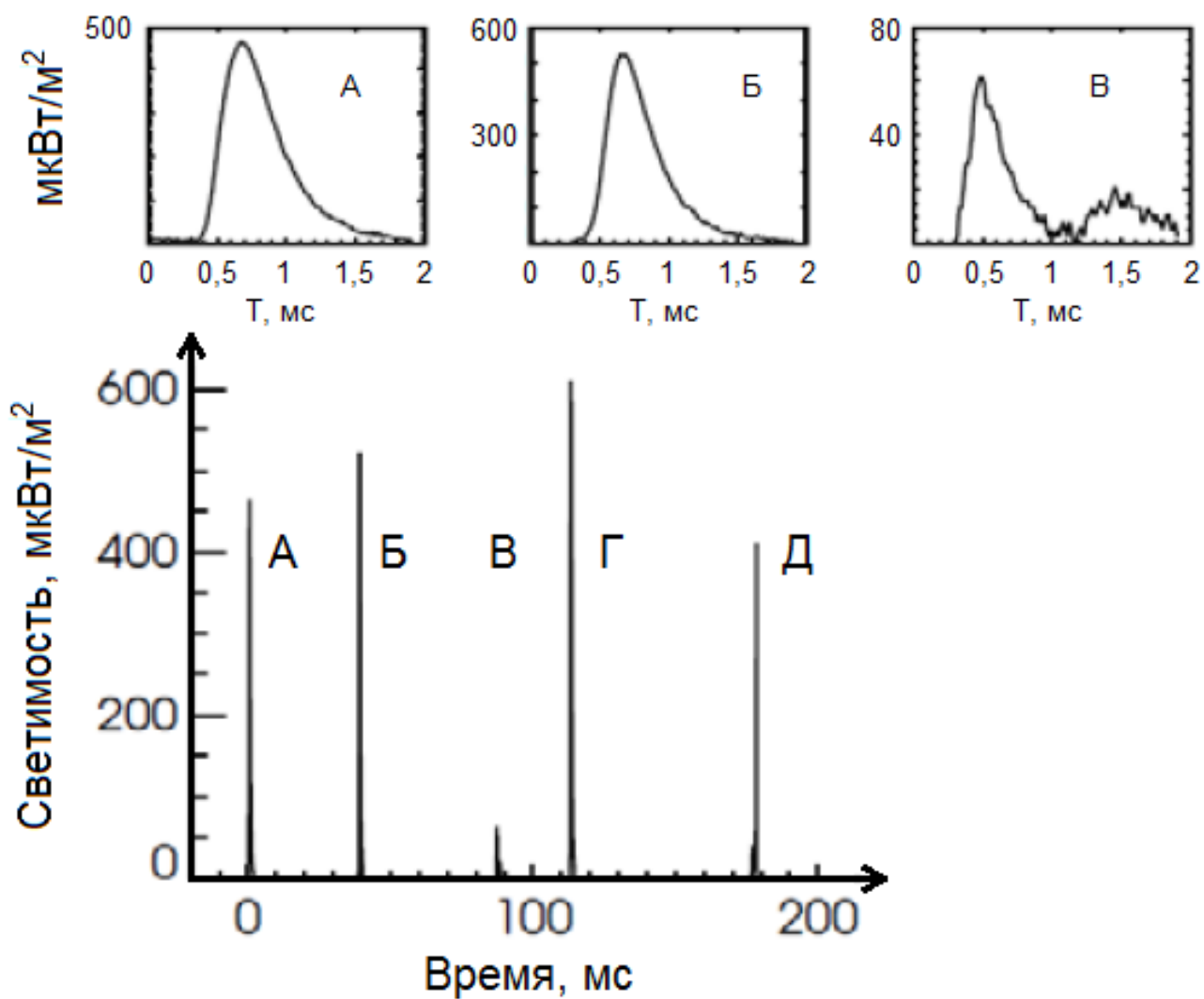


Рисунок 1.4.

Распределение импульсов по длительности свечения по данным [17] приведено на рисунке 1.5. Усредненная форма импульса приведена на рисунке 1.6.

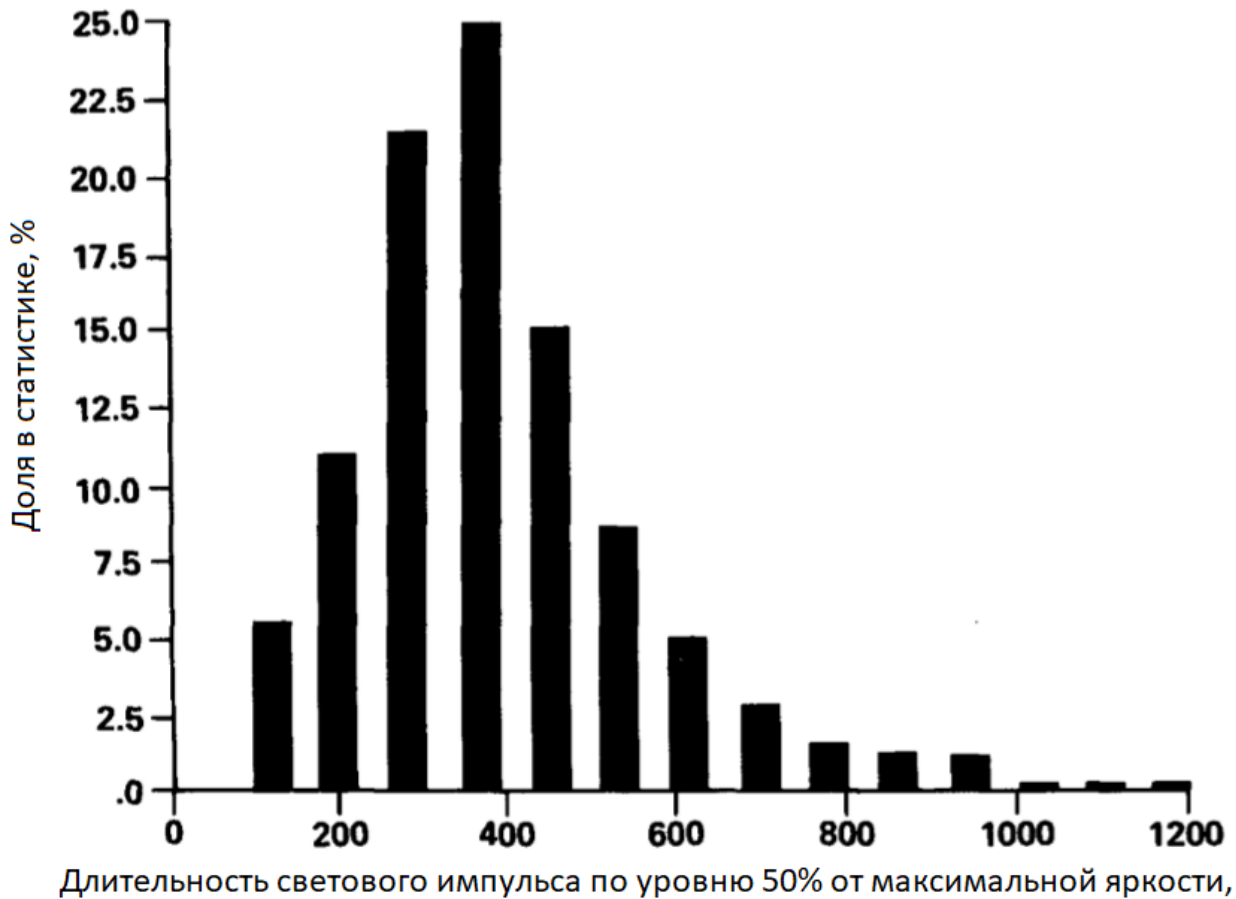


Рисунок 1.5. Распределение длительности импульсов по уровню 50% от максимума мощности, микросекунды. Только 16% импульсов вспышек имеют продолжительность менее 250 мкс. Медианная величина продолжительности (по уровню 0,5) составляет около 350 мкс, следовательно, медианная величина полной продолжительности составляет около 700 мкс.

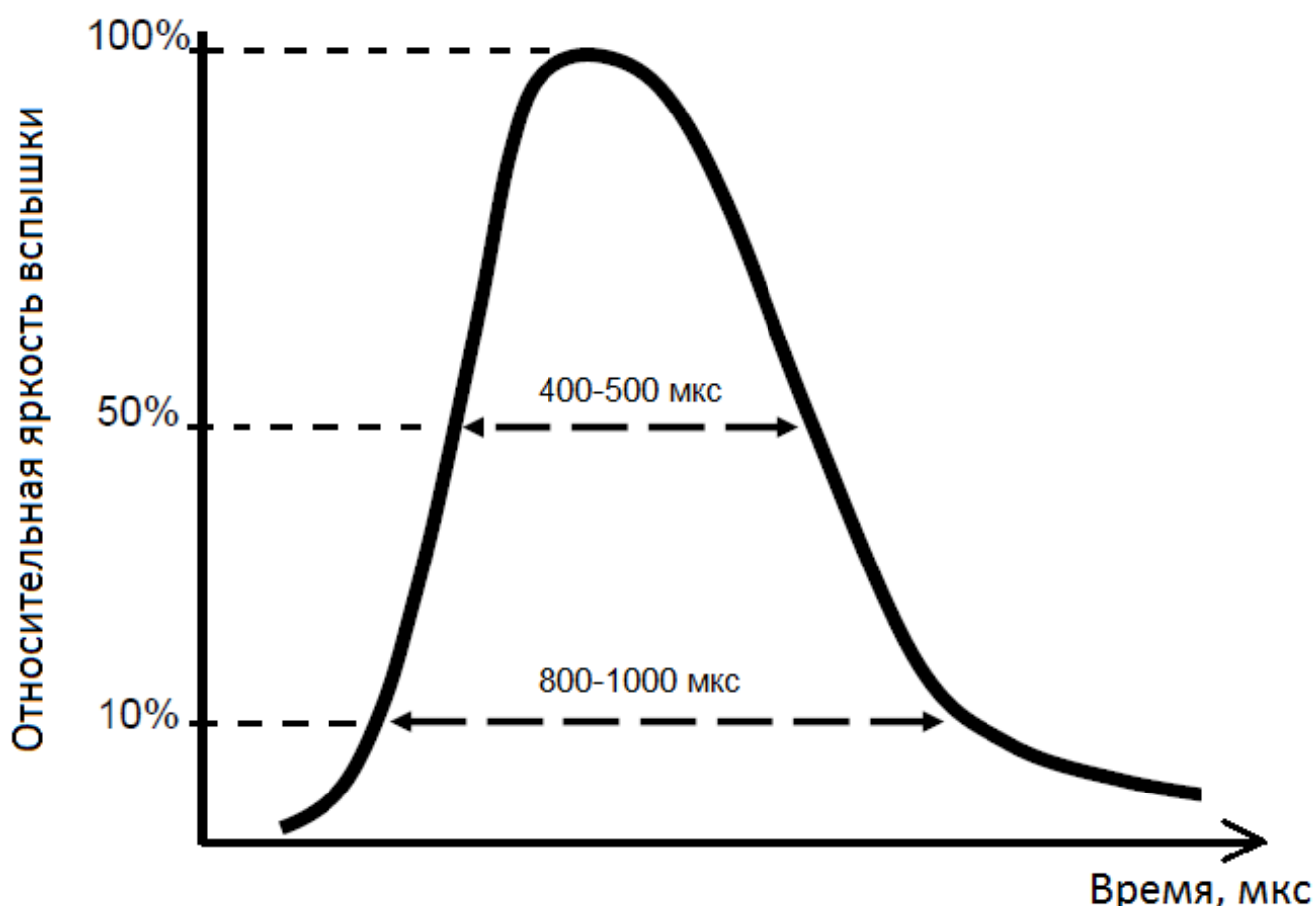


Рисунок 1.6. Усредненная зависимость яркости импульса от времени по данным [15]. Длительность импульса по уровню 50% здесь составляет 400-500 мкс, а заключено в этом промежутке 75% излучённой энергии.

Разработчики инструмента LI в своём докладе [15] указывают на длительность импульса вспышки 400-500 мкс по уровню 0,5 и 800...1000 мкс по уровню 0,1, что показано на рисунке 1.6. Анализируя данные на рисунках 1.5-1.6, можно сделать вывод, что при времени накопления 1 мс импульс будет целиком лежать в пределах двух последовательных по времени снимков.

График спектра свечения молнии показан на рисунке 1.7. Из этих данных видно, что на длине волны 777,4 нм отблеск имеет наибольшую спектральную плотность излучаемой яркости. Такой вывод сделан как разработчиками инструмента LI [16], так и разработчиками инструмента GLM в докладе [18]. По данным авторов работы [2], в этой линии свечения излучается 6% общей яркости вспышки. На первый взгляд, это мало, но указанная доля общего светового потока

приходится на очень узкую спектральную область шириной 0,35 нм. Следовательно, спектральная плотность энергии на длине волны 777,4 нм будет максимальной.

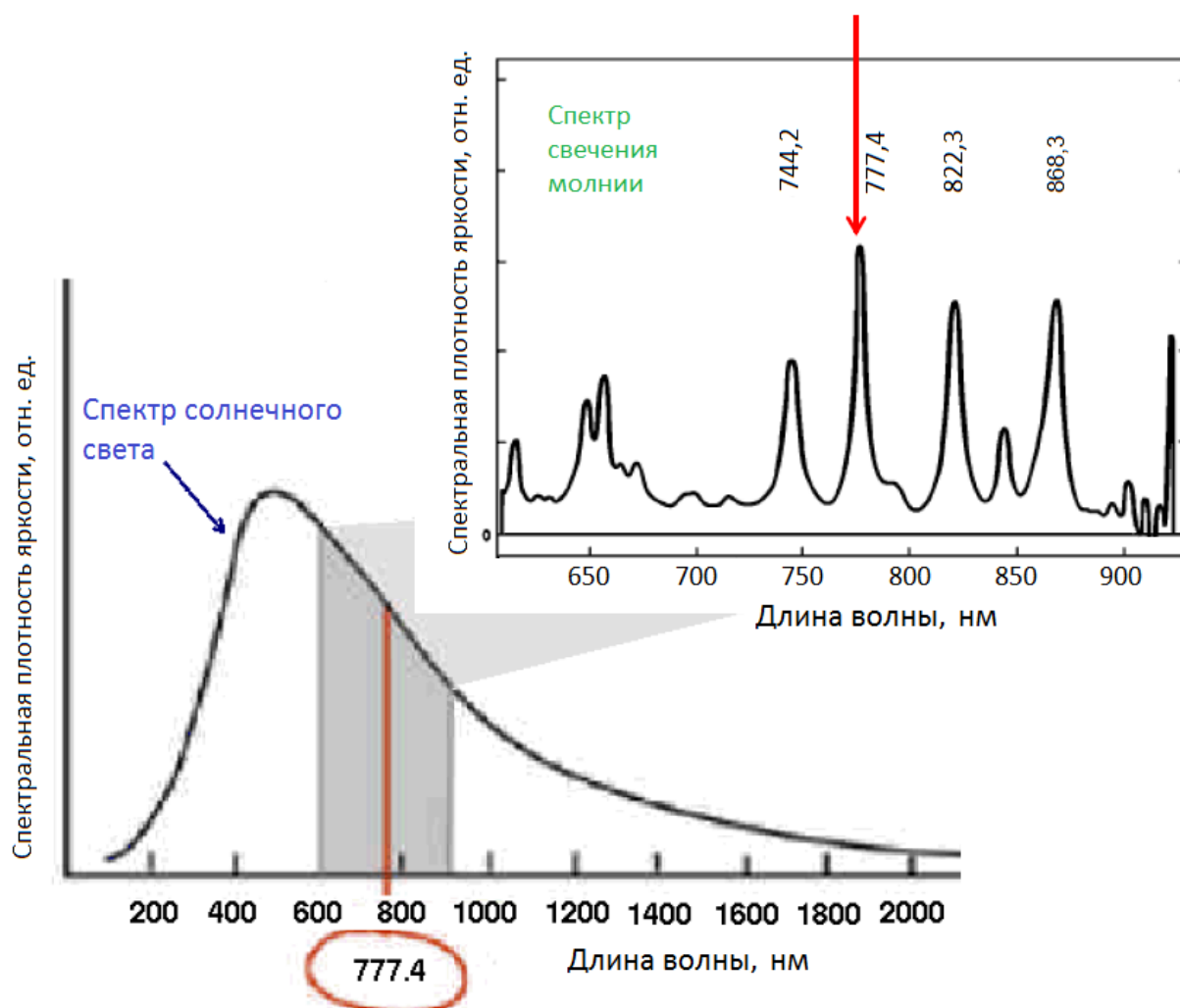


Рисунок 1.7. Спектры свечения молнии и Солнца

Это обуславливает выбор рабочего спектрального диапазона в окрестности длины волны 777,4 нм с шириной 1,5...2 нм. Данное решение применено во всех подобных приборах зарубежной разработки. На рисунке 1.8. показана интересующая область спектра в окрестности длины волны 777,4 нм.

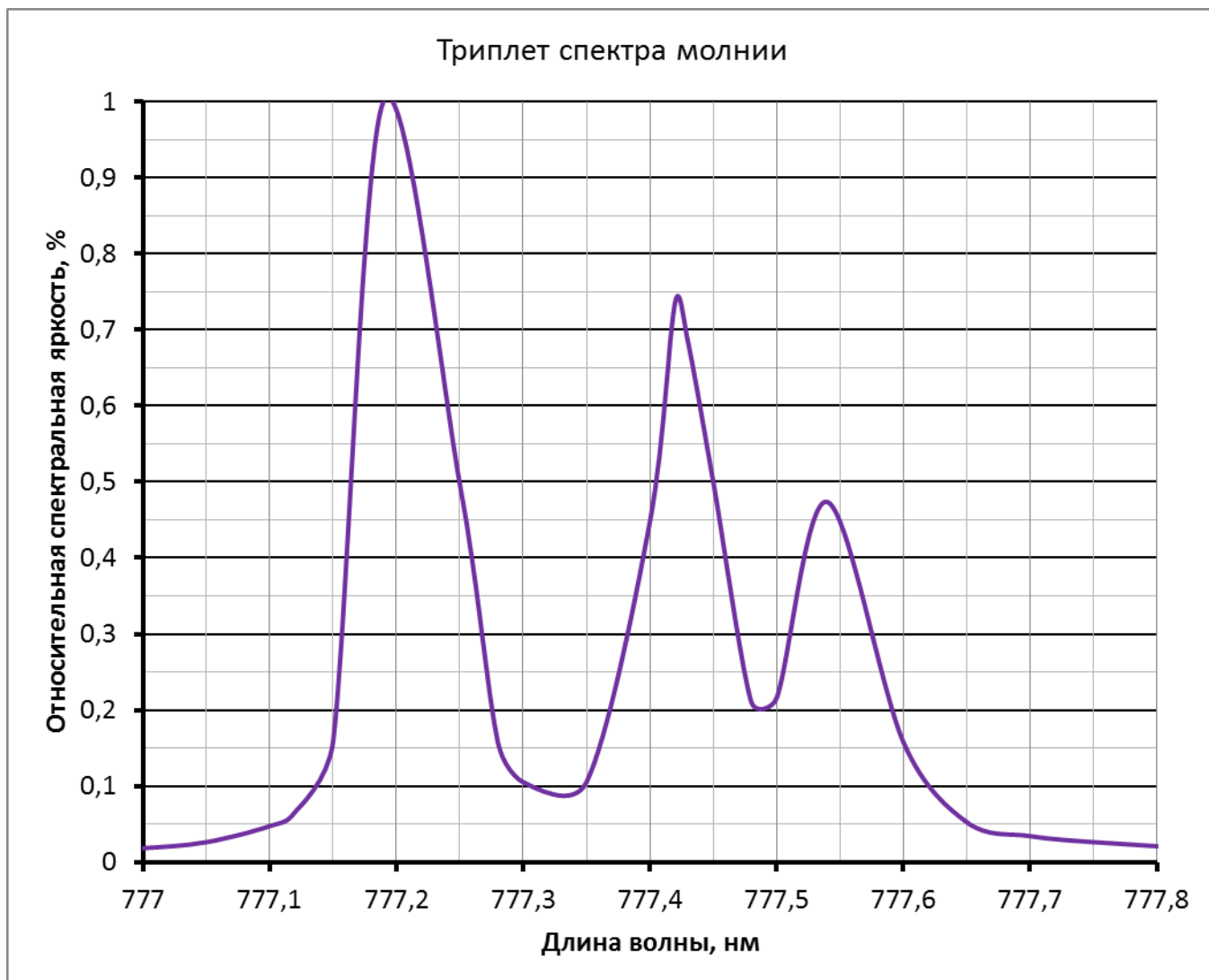


Рисунок 1.8. Рабочий триплет молнии в окрестности длины волны 777,4 нм.

Рабочая область спектра молнии имеет удвоенную полуширину, равную 0,35 нм и максимум спектральной яркости на длине волны 777,4 нм.

Из рисунка 1.8 видно, что ширина каждой линии на уровне 0,5 от её максимума не превышает 0,15 нм. Тогда в упрощённом виде спектр можно представить как три спектральные линии пренебрежимо малой ширины с центрами 777,19 нм; 777,42 нм и 777,54 нм. Исходя из относительной спектральной плотности, можно сказать, что левая линия содержит 45%, центральная – 33%, а правая – 22% общей энергии, излучённой вспышкой.

Следующим важным вопросом является количество энергии, высвеченной отблеском в наиболее яркой полосе 777,2...777,5 нм. Поскольку длительность

импульса сравнима со временем накопления или меньше его, то интенсивность свечения отблеска характеризуют не мощностью, а излученной энергией. Такой подход характерен, в частности, для [19]. По описываемым данным, интегральная яркость отблеска лежит в диапазоне $4 \dots 10$ мкДж/(м² · ср). Отметим, что значение интегральной яркости $4,7$ мкДж/(м² · ср) было принято в качестве зачетного для прибора LIS, установленного на низкоорбитальном КА TRMM [20], [21]. Разработчики геостационарного инструмента LI опираются на значение 10 мкДж/(м² · ср) в спектральной полосе $777,2 \dots 777,5$ нм [16].

Для проведения расчётов вероятности обнаружения вспышки и вероятности ложного срабатывания необходимо создать модель «типичной вспышки», так как в реальности характеристики наблюдаемого явления имеют большой разброс. Аналогом её с точки зрения классического ДЗЗ может служить тест-объект в виде трёхшпальной миры, по изображению которого и производится оценка разрешающей способности оптико-электронной камеры [22]. Единый критерий оценки разрешающей способности по трёхшпальной миры позволяет обеспечить сопоставимость характеристик приборов.

В случае ПАК ДМ зачётным объектом должна являться не трёхшпальная миры, а некоторая «зачётная вспышка», характеристики которой привязаны к модели реальных молний.

Зачётными условиями для создаваемого прибора приняты следующие параметры:

-Альbedo облаков в рабочем спектральном диапазоне: $0,8$;

-Яркость отблеска за всё время свечения импульса: от 5 до 10 мкДж/(м² · ср) для спектрального диапазона $777,2 \dots 777,5$ нм;

-Диаметр пятна на верхней границе облачности: 15 км;

-Длительность импульса: не более 1 мс;

-Количество импульсов в одной молнии: от 1 до 10 ;

Спектр молнии представляет собой триплет, показанный на рисунке 1.8. Длины волн триплета $777,19$ нм; $777,42$ нм и $777,54$ нм (в воздухе).

С учетом мирового опыта целесообразно выполнить детектор молний в виде высокоскоростной кадровой оптико-электронной камеры. Съёмка должна выполняться в узком спектральном диапазоне с центральной длиной волны 777,4 нм что соответствует ближнему ИК диапазону, практически на границе видимого диапазона. При этом, несмотря на очень узкий спектральный диапазон, освещенность фокальной плоскости отраженным от облаков солнечным светом достаточно велика. Поэтому время накопления выбирается таким образом, чтобы оно было достаточным для накопления всей энергии импульса, но при этом не было избыточным, чтобы минимизировать величину сигнала от облачного фона.

Для больших возвышений Солнца над горизонтом сигнал от отраженного солнечного света будет примерно в 100 раз больше сигнала от отдельного отблеска молнии. Фоновый уровень, создаваемый отраженным от облаков светом, можно вычесть из общего сигнала, но фотонный шум при этом сохранится. Как известно, фотонный шум (выраженный в фотоэлектронах) пропорционален квадратному корню из количества фотоэлектронов сигнала [22]. Можно прийти к выводу, что для увеличения отношения «сигнал от молнии/шум» необходимо максимально увеличить величину сигнала как от молнии, так и от фона: с ростом сигнала шум от фона растёт медленнее. Шумом от сигнала, созданного отблеском молнии, можно пренебречь.

Требование максимизации сигнала противоречит требованиям к узости рабочего спектрального диапазона и малости времени накопления. Поэтому датчики молний в обязательном порядке используют светосильную оптику (1/1,2 для прибора GLM) и фотоприёмную матрицу с большими значениями размера пикселя и его зарядовой ёмкостью (сигналом насыщения).

Модель фоноцелевой обстановки наглядно можно представить на рисунке 1.9. Основной вклад в общий шум вносит фотонный шум, равный корню квадратному из количества накопленных в пикселе электронов [22]. Следовательно, днём (при большой яркости облаков) условия съёмки будут значительно хуже, чем ночью, когда фоновый сигнал практически нулевой.

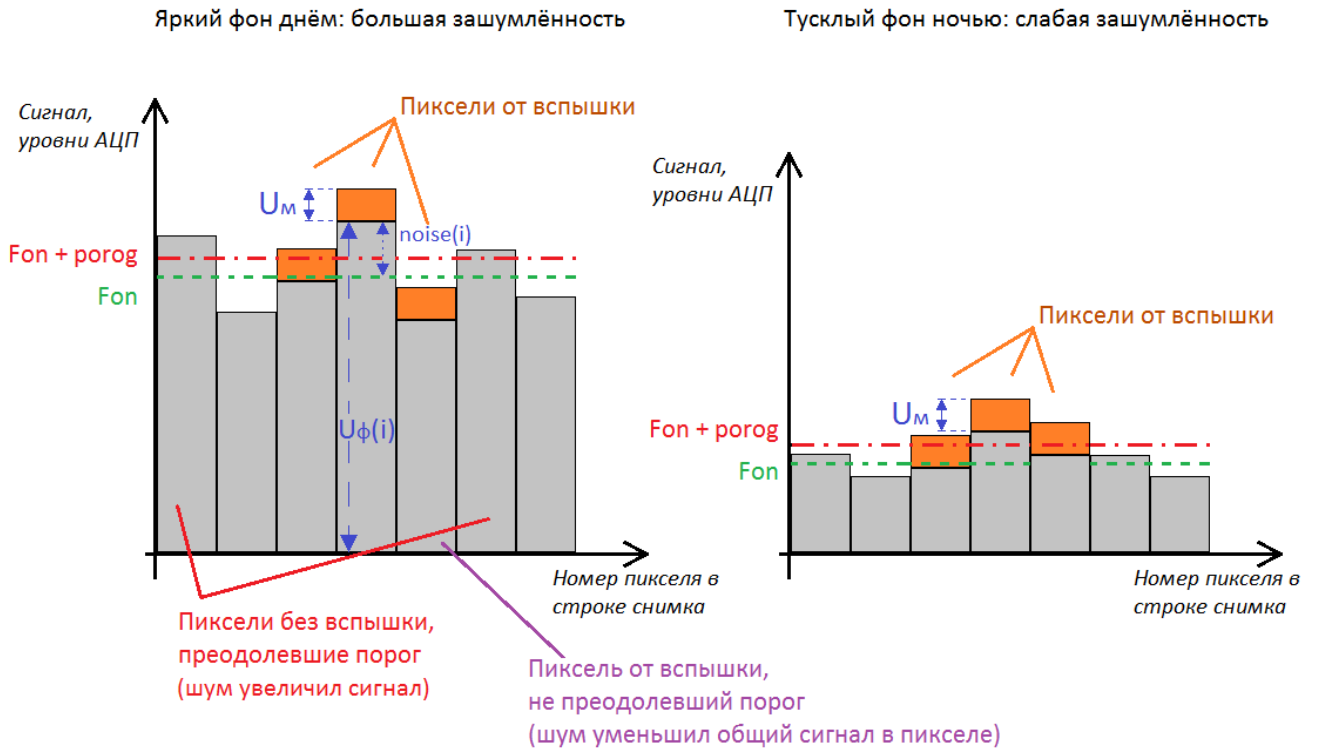


Рисунок 1.9. Модель фоноцелевой обстановки для дневной и ночной сторон витка.

В каждом пикселе с номером i , содержащем вспышку, сигнал представляет собой сумму сигналов от фона (облаков) и вспышки: $U(i) = U_{\phi}(i) + U_m(i)$. В свою очередь, сигнал от фона $U_{\phi}(i)$ можно представить как сумму среднего фона $F_{\text{он}}$ и шума в пикселе $\text{noise}(i)$. Тогда $U(i) = U_{\phi}(i) + U_m(i) = F_{\text{он}} + \text{noise}(i) + U_m(i)$. При этом величина шума днём сравнима по величине с разностным сигналом $U(i) - F_{\text{он}}$. Таким образом, даже при вычитании фонового сигнала изображение останется зашумлённым. Именно это порождает необходимость построения сложного алгоритма выделения тусклых вспышек на сильно зашумлённом фоне. На рисунке 1.9 видно, что днём не все пиксели со вспышкой преодолели порог и при этом есть выбросы фона, прошедшие фильтрацию.

В существующих детекторах молний алгоритмы основаны на пороговой фильтрации: пиксель может содержать вспышку, только если сигнал превышает некоторый пороговый уровень: $U(i) > F_{\text{он}} + \text{porog}$, или же (после вычитания фона) $U(i) - F_{\text{он}} > \text{porog}$. Фоновый сигнал в каждом пикселе $F_{\text{он}}$ вычисляется по предшествующим снимкам, не содержащим вспышек в данной точке.

Отметим, что все сигналы здесь приведены в уровнях квантования аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и, соответственно, являются целыми числами. Хотя сумма $F_{0n} + \text{rogo}$, очевидно, является целым числом, каждое из слагаемых по отдельности, теоретически, может иметь дробную часть. Но для снижения нагрузки на вычислительное устройство желательно избежать нецелых значений этих параметров, так как задача высокоскоростной обработки большого потока данных требует оптимизации вычислений. То есть величину порога rogo нужно задавать как целое число уровней АЦП. Фоновый сигнал F_{0n} при усреднении предшествующих снимков, естественно, может принять нецелое значение, но для ускорения обработки снимков должен быть округлён.

Необходимо отметить, что рассмотренная модель наблюдения молнии применима не только к низкоорбитальным, но и к геостационарным детекторам молний. Главным отличием последних является наличие в кадре местностей, наблюдаемых под малым углом визирования. Следовательно, при использовании данной модели в разработке геостационарных детекторов молний необходимо учитывать не только фактические, но и видимые размеры отблесков.

1.2. Обзор существующих детекторов молний

1.2.1. Низкоорбитальные системы

Одним из первых космических устройств для обнаружения молний была камера OTD (Optical Transient Detector), выведенная на орбиту в 1995 году на борту КА «MicroLab-1». Спутник обращался по орбите высотой 740 км, пространственное разрешение детектора молний при этом составляло около 9 км [23].

Наибольшую известность приобрёл американский инструмент LIS (Light Imaging Sensor), запущенный в 1997 году в составе КА TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission). Этот прибор впервые позволил регистрировать молнии, как на ночной, так и на дневной стороне Земли. Данные, полученные с этого прибора, позволили существенно уточнить климатические модели Земли [20]. Инструмент покрывает 81% поверхности Земли, но при этом фиксируются 98% всех молниевых событий в атмосфере.

В 2016 году запасной образец LIS, хранившийся 19 лет на заводе-изготовителе, был доставлен на МКС и установлен на её внешней поверхности. Таким образом был продолжен эксперимент по непрерывному наблюдению молний с КА на низкой околоземной орбите (НОО). Данный прибор получил название ISS LIS.

Эксплуатация LIS позволила составить карту распределения частоты молний по поверхности Земли [20], показанную на рисунке 1.10. Общий вид комплекса LIS показан на рисунке 1.11. Области покрытия систем LIS и OTD показаны на рисунке 1.12.

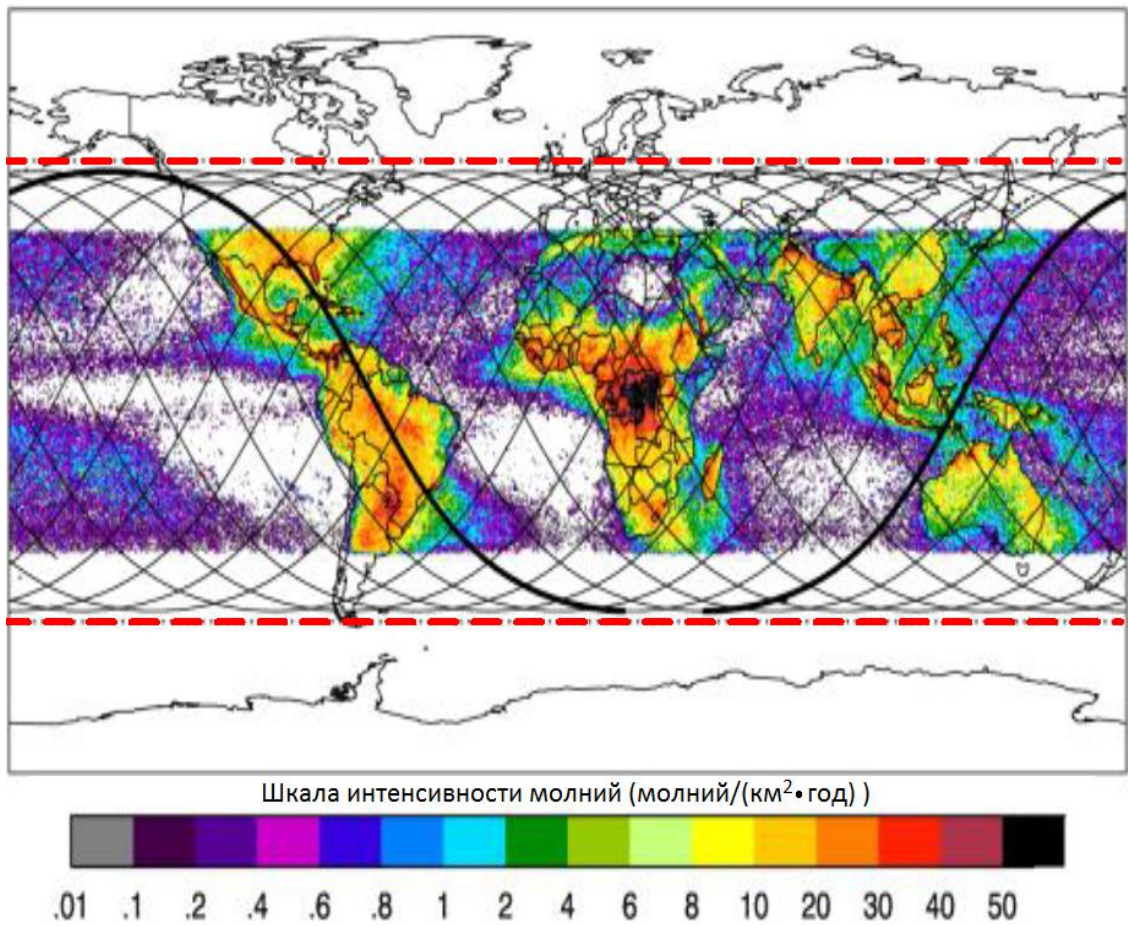


Рисунок 1.10. Распределение частоты молний (молний/(км²•год)) по данным ISS LIS.

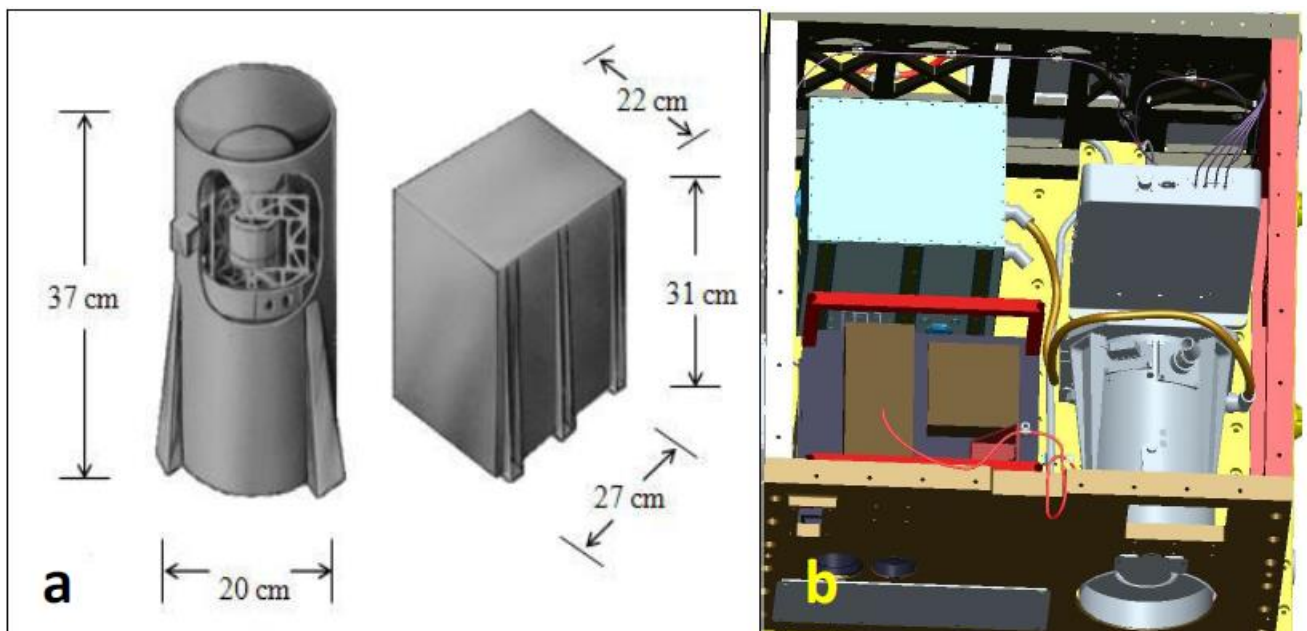


Рисунок 1.11. Габаритные размеры и 3D-модель камеры LIS по данным [20]

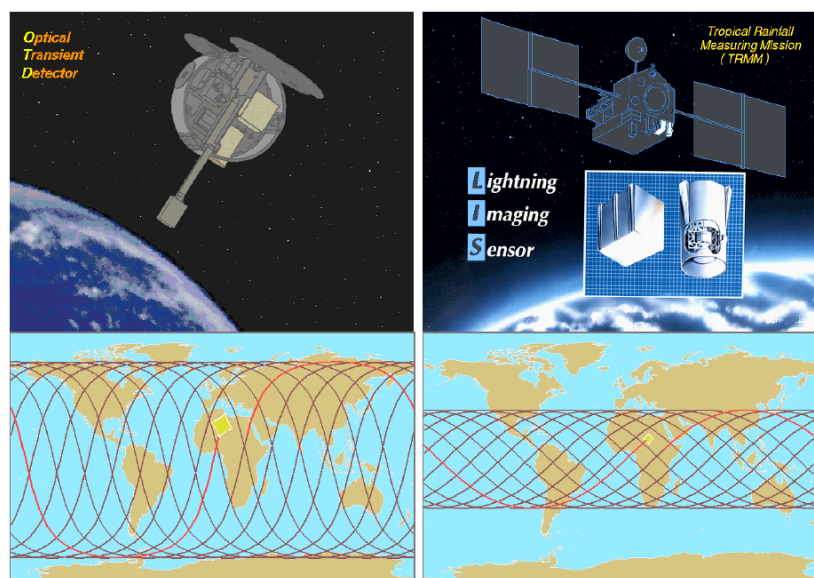


Рисунок 1.12. Области покрытия низкоорбитальных детекторов молний OTD и LIS по данным [20]

Кроме описанных выше двух систем, в США был создан инструмент LLS, работавший на КА «FORTE» совместно с фотодиодом PDD [24]. Отличительной особенностью системы LLS является большое наклонение орбиты (70 градусов), что позволяло проводить обзор всей поверхности Земли. Однако вследствие значительной высоты полёта (825 км) пространственное разрешение камеры было не лучше 10 км [24], [25].

Также среди низкоорбитальных систем следует отметить французский инструмент MCE, установленный на микроспутнике семейства MuTiade для выполнения научной миссии TARANIS. Он должен быть запущен в 2020 году и, в отличие от систем LIS и OTD, будет обеспечивать наблюдение с солнечно-синхронной орбиты, имеющей наклонение 98° и высоту 700 км. Одной из задач системы MCE является проверка наблюдений, выполненных геостационарным детектором GLM [26].

В России только один подобный проект был доведён до этапа летных испытаний: камера ЦФК на микроспутнике Чибис-М, запущенном с борта МКС в январе 2012 года и проработавшем 2,5 года. Камера обладала рядом интересных решений, в частности, предусматривалась совместная работа с гамма-детектором в составе комплекса аппаратуры «Гроза» [27], [28]. Также закладывалась возможность бинирования пикселей 2×2 . Однако полностью миссия выполнена не была. Вследствие проблем с ориентацией спутника имела место значительная

погрешность координатной привязки обнаруженных молний. Кроме того, поле зрения объектива (~30 градусов) оказалось недостаточным для обеспечения большой области совместной регистрации с детекторами других диапазонов. Также отмечены трудности с передачей значительных объемов информации на Землю [29]. Главным недостатком прибора можно считать чрезвычайно малую кадровую частоту: 12...15 Гц в полноформатном режиме ПЗС-фотоприёмника. Обзор литературы по физической модели молнии показал, что это крайне мало для работы на дневной стороне витка: либо время накопления получится много больше длительности свечения отблеска, либо между последовательными кадрами будет большой промежуток времени без накопления сигнала. Второй вариант порождает возможность для пропуска светового импульса: промежуток времени между закрытием и открытием «электронного затвора» значительно больше времени свечения.

Самым новым к настоящему моменту можно назвать комплекс аппаратуры ММIA, изготовленный в Дании и установленный в 2018 году на МКС для проведения эксперимента ASIM. Система включает в себя камеры для длин волн 777,4 нм и 337 нм, а также три фотодиода, из которых один предназначен для ультрафиолета (180-230 нм) [30]. Наличие большого количества спектральных диапазонов позволяет ожидать новых результатов изучения редких явлений TLE и TGF (высотные молнии и гамма-вспышки земного происхождения соответственно) [31]. Камера для длины волны 777,4 нм имеет скорость съёмки только 12 кадров/с, что весьма мало, по крайней мере, для наблюдения классических молний. Можно предположить, что это связано с технологическими ограничениями используемого ПЗС-фотоприёмника. Частично это компенсируется высокочастотным фотодиодом на ту же длину волны 777,4 нм, но он является одноэлементным приёмником, покрывающим область размером 470*470 км. Отметим, что синхронизация этих двух устройств не позволяет обеспечить точность привязки порядка проекции пикселя 0,4 км. Заявленная точность привязки данных составляет $\pm 1^\circ$, что соответствует ± 7 км для высоты орбиты 400 км [30].

На основе источников параграфа 1.2.1 составлена таблица 1.1., где приведены характеристики некоторых детекторов молний, созданных для НОО.

Таблица 1.1. Основные характеристики детекторов молний для НОО

Параметр	OTD	LIS	LLS	ЦФК	TARANIS	MMIA/CHU2
Космический аппарат	MicroLab-1	TRMM	FORTE	Чибиc-M	Myriade	МКС, проект ASIM
Дата запуска	1995	1997	1997	2012	2020 (план)	2018
Высота орбиты, км	740	350	825	480	700	400
Угловое поле зрения, градусы	75*75	80*80	80*80	24*24	33*33	61*61
Размер проекции пикселя, км	8,9	4	11	0,4	1,1	0,4
Размер снимка, пиксели	128*128	128*128	512*512 (без бинир.)	1000*1000 (без бинир. 2*2)	1024*1024 (без бинир. 2*2)	1024*1024 (без бинир. 2*2)
Размер области, покрываемой одним снимком, км	1135*1135	600*600	1390*1390	400*400	1100*1100	470*470
Кадровая частота, Гц	500	500	405 (с бин. 4*4)	12...15		12
Тип фотоприёмника	ПЗС	ПЗС	ПЗС	ПЗС	ПЗС (e2v CCD 47-20)	ПЗС (e2v CCD201)
Размер пикселя, мкм	40		15 (без бинир.)		13 (без бинир.)	13 (без бинир.)
Разрядность АЦП, бит		12		12		12
Рабочая длина волны, нм	777,4	777,4	777,4		777,4	777,4
Удвоенная полуширина спектра пропускания светофильтра по уровню 0,5, нм	0,856	1	1,2		10	3
Фокусное расстояние объектива, мм	3,3		5,3	18	17	13
Относительное отверстие объектива	1/1,6	1/1,6	1/1,67	1/2	1/1,6	
Максимальный угол падения луча на светофильтр, градусы	5	5				
Зачётная яркость пятна от молнии, мкДж/(м ² *ср)	4,7	4,7				
Отношение сигнал/шум для зачетной молнии, не менее		6				
Вероятность распознавания зачётной молнии, не менее	0,65	0,9				
Вероятность ложной молнии, не более		0,05				
Масса комплекса аппаратуры, кг	-	20			2,85	
Габаритные размеры, мм	Камера	370*ø200			212*160*200	
	Запоминающее устройство	310*220*270				

1.2.2. Геостационарные системы

Размещение детекторов молний на геостационарной орбите (ГСО) даёт возможность одновременного обзора половины Земли. Кроме того, реализуется постоянное наблюдение за экваториальными зонами Земли, содержащими в себе наиболее активные с точки зрения молний регионы: Индия, Экваториальная Африка, Южная Америка.

Такие системы гораздо сложнее в реализации, чем низкоорбитальные комплексы регистрации молний. Главными проблемами здесь являются большие габариты (при одинаковых проекциях пикселя фокусное расстояние геостационарной камеры будет в 80-100 раз больше, чем у низкоорбитальной) и низкое пространственное разрешение на краях видимого диска Земли, где угол визирования близок к нулю. Кроме того, неподвижность КА относительно Земли приводит к тому, что более 50% её площади никогда не будут отсняты камерой. Таким образом, для полноценного обзора Земли в режиме реального времени требуется не менее трёх геостационарных КА, оснащённых детекторами молний. Кроме того, геостационарные системы способны обзирать лишь небольшую часть площади России.

Ещё одной проблемой геостационарных детекторов является создание фотоприёмника с уникальным сочетанием характеристик. Требования на крупный формат фотоприёмника и его высокую кадровую частоту являются, в значительной степени, взаимоисключающими. Для обзора одной камерой всего видимого диска Земли с разрешением 10 км (в подспутниковой точке) фотоприёмник должен иметь формат не менее 1100*1100 пикселей. Такой формат кадра при частоте съёмки 1000 Гц требует создания уникального прибора. Отметим, что здесь приведены расчёты для проекции пикселя 10 км, а не 5 км (типичная величина для низкоорбитального инструмента). Улучшение пространственного разрешения до 5 км требует создания камеры с фотоприёмником формата 2200*2200 пикселей или четырёх камер с фотоприёмниками 1100*1100 пикселей.

Таким образом, пространственное разрешение геостационарного детектора молний в реальности будет хуже, чем у низкоорбитального. Улучшение пространственного разрешения до величин 3...4 км, возможное в низкоорбитальном детекторе с гибкими характеристиками, позволяет исследовать малоизученные типы молниевых явлений и обеспечить его работу с регистраторами других диапазонов.

Первым детектором молний на геостационарной орбите стал американский прибор GLM (Geostationary Lightning Mapper), показанный на рисунке 1.13. Он предназначен для установки на борт КА серии GOES-R [18]. Разработка прибора GLM началась в 2005 году, а запуск состоялся в 2016 году. Интереснейшей особенностью прибора является применение матричного ПЗС-фотоприёмника с переменным (от центра к краю) размером пикселя. Это позволяет частично парировать ухудшение пространственного разрешения на краях видимого диска Земли вследствие наблюдения под большим углом визирования.

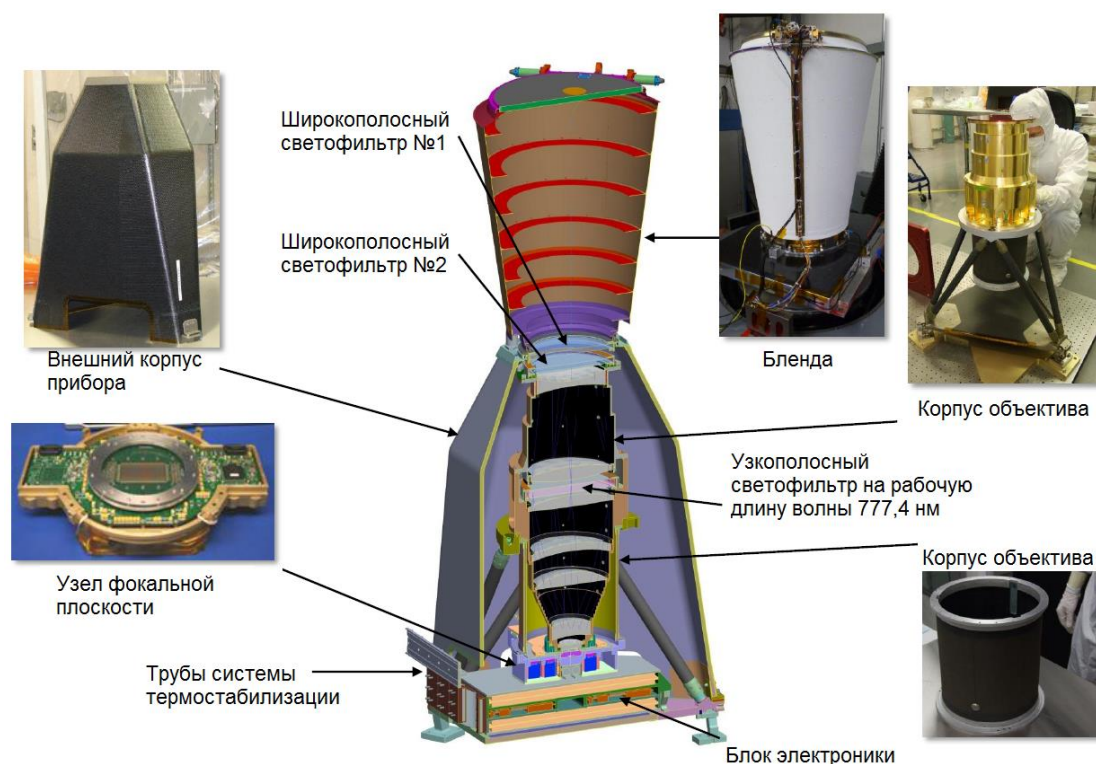


Рисунок 1.13. Устройство прибора GLM

Кроме того, в настоящее время в Европе идёт разработка геостационарного инструмента LI (Lightning Imager). Он предназначен для установки на борт

перспективного геостационарного гидрометеорологического КА Meteosat 3-го поколения MTG-I. Общий вид прибора показан на рисунке 1.14. Комплекс содержит в себе 4 одинаковых камеры, общее поле зрения которых обеспечивает покрытие большей части видимого диска Земли (рисунок 1.15) [16].

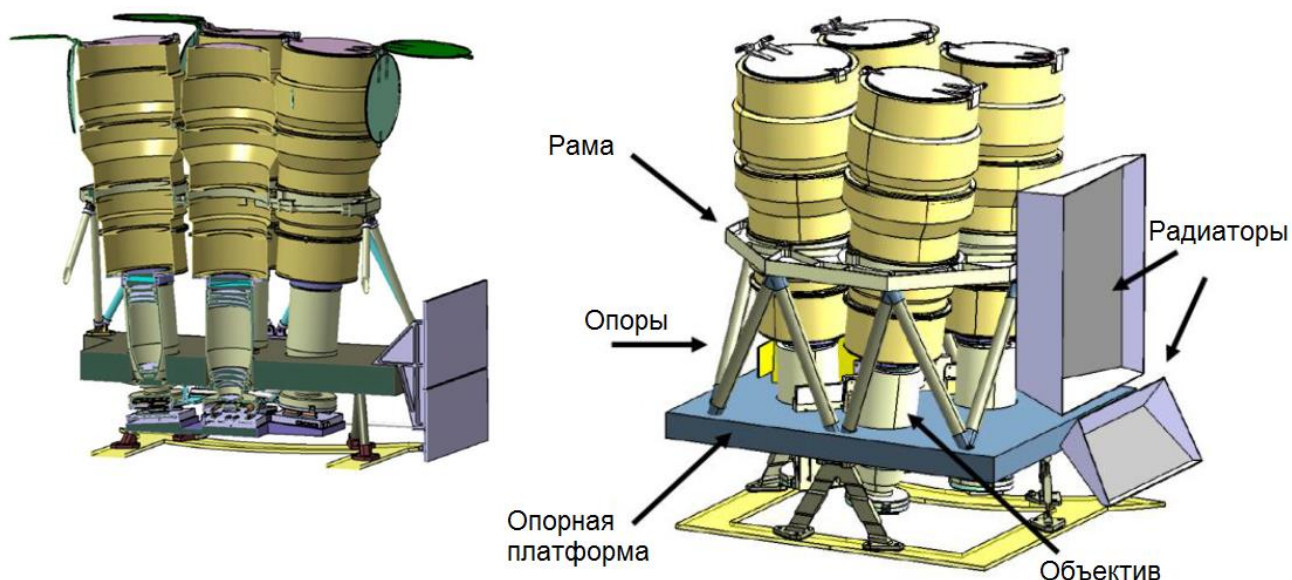


Рисунок 1.14. Вид прибора LI

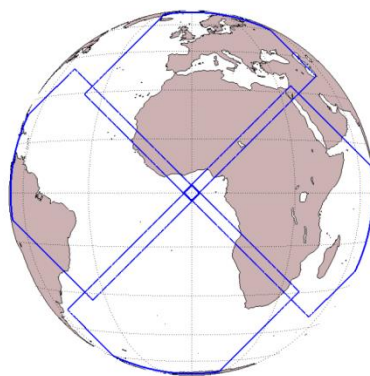


Рисунок 1.15. Поля обзора четырёх камер геостационарного детектора LI

Также в 2016 году на борту китайского геостационарного КА FY-4A заработал инструмент LMI (Lightning Mapping Imager), состоящий из двух камер. КА размещён в точке стояния $99,5^\circ$ в.д., что позволяет двум камерам в совокупности покрывать всю территорию Китая [32].

На основе источников параграфа 1.2.2 составлена таблица 1.2, где приведены основные характеристики геостационарных приборов.

Таблица 1.2. Основные характеристики созданных или разрабатываемых детекторов молний космического базирования для ГСО.

Параметр	GLM	LI (4 камеры)	LMI (2 камеры)
Космический аппарат	GOES-R	Meteosat (MTG-I)	FY-4A
Дата запуска	2016	2021 (план)	2016
Высота орбиты, км	35798	35798	35798
Угловое поле зрения, градусы	13,1*12,4	10*12 (для одной камеры)	
Размер проекции пикселя в надир, км	~8	~6	7,8
Размер снимка, пиксели	1372*1300	1170*1000 (для одной камеры)	400*300 (для одной камеры)
Кадровая частота, Гц	500	1000	500
Тип фотоприёмника	ПЗС с обратной засветкой	КМОП	ПЗС
Размер пикселя, мкм		24	
Разрядность АЦП, бит	14	12	12
Рабочая длина волны, нм	777,4	777,6	
Удвоенная полуширина спектра пропускания светофильтра по уровню 0,5, нм	1	1,9	1,0
Фокусное расстояние объектива, мм	134	191	
Относительное отверстие объектива	1/1,2	1/1,73	
Максимальный угол падения луча на светофильтр, градусы		6	
Зачётная яркость пятна от молнии, мкДж/(м ² *ср)	4,7	10	
Отношение сигнал/шум для зачетной молнии, не менее	4		6
Вероятность распознавания зачётной молнии, не менее	0,9	0,7	0,9
Вероятность ложной молнии, не более	0,05		0,1
Масса комплекса аппаратуры, кг	124	93 (4 камеры + блок управления)	
Габаритные размеры, мм	Камера	810*660*1500	715*1200*1456 (сборка из 4 камер)
	Запоминающее устройство		300*240*160

1.3. Направления совершенствования низкоорбитальных систем

Анализ существующих низкоорбитальных приборов позволяет выделить следующие направления совершенствования таких систем:

- 1) Обеспечение высокой вероятности обнаружения молний не только на ночной, но и на дневной стороне витка.
- 2) Переход на КМОП-фотоприёмники, лучше подходящие для работы в высокоскоростных камерах, чем традиционные ПЗС-приборы. Опыт создания приборов LIS и ОТД [20], [21], [33] показывает, что на ПЗС-фотоприёмниках формата порядка 128*128 пикселей можно достичь только кадровой частоты не более 500 Гц. Кроме того, такой формат изображения ограничивает возможности регулировки характеристик детектора молний. Описанное схемотехническое решение позволяет существенно снизить мощность, потребляемую съёмочной аппаратурой [13]. Кроме того, переход на КМОП-матрицу позволяет отказаться от аналогово-цифрового прибора в виде отдельной ячейки. Совмещение АЦП и фотоприёмника отвечает современным тенденциям приборостроения для ДЗЗ в части внедрения принципа «система на кристалле» [12]. Отметим, что использование встроенной функции вырезания окна даёт возможность регулировать кадровую частоту и размер снимка, что важно при совместной работе ПАК ДМ и гамма-детектора;
- 3) Использование фотоприёмников большого формата совместно с бинированием пикселей. Для КМОП-матрицы, соответственно, бинирование возможно только в цифровом виде, уже после получения полноформатного исходного изображения. Реализация такого решения позволяет фактически изменять в проекцию пикселя в процессе работы детектора молний (например, при бинировании 3*3 пикселя фотоприёмник форматом 1200*1200 пикселей выдаёт изображение 400*400 пикселей). Таким образом, при плохих условиях съёмки включается цифровое бинирование пикселей, результирующее изображение имеет малый формат и большую проекцию пикселя, но при этом сохраняется требуемое соотношение сигнал/шум. Но при хороших условиях съёмки (малая яркость фона) бинирование можно уменьшить или вовсе его исключить. Это позволяет улучшать разрешающую способность при хороших условиях съёмки, когда требуемое соотношение сигнал/шум достигается без сложения сигнала по нескольким «исходным» пикселям.

ГЛАВА 2. ОБЛИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО БЛОКА

2.1. Обоснование необходимых характеристик детектора молний

Комплекс ПАК ДМ состоит из двух устройств: оптико-электронного блока (ОЭБ) и блока обработки. Функции обработки изображений, хранения данных и управления ПАК ДМ вынесены в блок обработки, так как это целесообразно с точки зрения тепловых режимов оптической системы (работа мощного процессора порождает значительные тепловые потоки).

Перед работой над камерой ОЭБ необходимо сформировать и обосновать её основные характеристики:

- 1) Проекция пикселя;
- 2) Размер снимка;
- 3) Кадровая частота и время накопления;
- 4) Разрядность аналогово-цифрового преобразователя;
- 5) Требуемая вероятность обнаружения истинного и ложного отблеска.

2.1.1. Размер проекции пикселя

Как было показано в описании модели молнии, характерный диаметр пятна-отблеска составляет не менее 15 км. Следовательно, возникает два пути для определения требуемого разрешения:

- 1) Размер проекции пикселя устанавливается таким образом, чтобы отблеск от вспышки гарантированно помещался внутри одного пикселя. Следовательно, речь идёт о величинах не менее 30-40 км.
- 2) Обратный способ: проекция пикселя подбирается так, чтобы типичный отблеск гарантированно занимал не один, а несколько пикселей изображения. Тогда проекция пикселя должна быть не более 7 км.

У каждой из описанных идеологий есть свои преимущества и недостатки. В первом случае крайне низкое пространственное разрешение системы существенно упрощает требования к габаритам объектива и формату фотоприёмника. Но, в

свою очередь, второй принцип имеет неоспоримое достоинство с точки зрения комплексного проектирования ПАК ДМ. Так как изображение отблеска молнии гарантированно занимает более чем один пиксель, то появляется возможность ввода в алгоритм обработки данных дополнительного критерия селекции вспышек и шумовых выбросов сигнала. Вероятность того, что два соседних пикселя одновременно будут иметь высокие шумовые выбросы сигнала, крайне мала. Тогда, если в этих смежных пикселях есть превышение пороговой разницы с фоном, то появится ещё один признак наличия вспышки в этой области снимка. Подробно этот критерий будет описан в Главе 3.

Так как детекторы молний космического базирования имеют практически предельные характеристики с точки зрения возможностей сегодняшней элементной базы, то целесообразно не пренебрегать возможностью создания дополнительного критерия отсеки ложных вспышек и пойти по второму пути. Это позволит обеспечить получение качественной информации даже при больших углах возвышения Солнца.

2.1.2. Размер снимка

В задаче определения необходимого размера снимка ключевыми являются четыре фактора:

- 1) С точки зрения научных задач ПАК ДМ целесообразно обеспечить размер кадра, в котором будет помещаться характерный грозовой фронт. Таким образом, можно будет обеспечить одновременную регистрацию вспышек по всей площади облачной зоны. Существующие низкоорбитальные системы имеют размер кадра от 470*470 до 1300*1300 км.
- 2) Технологические ограничения оптики. В настоящее время даже короткофокусные объективы не способны обеспечить поле зрения более 90 градусов по диагонали кадра. Существуют и более широкопольные оптические системы вида «рыбий глаз», но создаваемые ими геометрические искажения сделают задачу координатной привязки снятых вспышек крайне сложной. Кроме того, широкое поле зрения объектива порождает большой

разброс углов падения на интерференционный светофильтр, что недопустимо в подобных системах. Если принять в качестве рабочего значения поле зрения $60^{\circ} \times 60^{\circ}$ градусов, то при высоте орбиты 450 км размер кадра составит $520^{\circ} \times 520^{\circ}$ км.

- 3) Формат фотоприёмника. Высокоскоростные фотоприёмники не имеют большого формата, следовательно, предельный размер кадра определяется ещё и требуемой проекцией пикселя. Проблема формата высокочастотного фотоприёмника имеет место в системах на ПЗС-матрицах: так, в приборах LI и OTD формат кадра крайне мал: всего лишь $128^{\circ} \times 128^{\circ}$ пикселей. При характерном размере снимка $500^{\circ} \times 500^{\circ}$ км и проекции пикселя не более 5 км имеем требование на формат изображения не менее $100^{\circ} \times 100^{\circ}$ пикселей при максимальном бинировании исходных снимков. С учётом реализации гибкости характеристик ПАК ДМ (бинирование пикселей и регулировка формата кадра) размер КМОП-фотоприёмника должен быть значительно больше, порядка $800^{\circ} \times 800^{\circ}$ пикселей при кадровой частоте 1000 Гц.
- 4) Полоса захвата ПАК ДМ в сочетании с наклоном орбиты КА определяет область географических широт, доступную для наблюдения.

2.1.3. Кадровая частота и время накопления

Как было показано в разделе 1.1, длительность светового импульса не превышает 1 мс. Следовательно, и время накопления целесообразно взять именно таким. Меньшее время накопления сигнала приведёт к тому, что энергия, высвеченная отблеском, разделится между несколькими снимками, последовательными по времени. Если же наоборот, увеличивать время накопления сигнала, то будет иметь место ненужное нам увеличение фонового сигнала. Допустим, отблеск начал светиться одновременно с открытием электронного затвора, а время накопления мы заранее задали 5 мс. Через 1 мс отблеск прекратил свечение. Тогда оставшиеся 4 мс в пикселе будет накапливаться только сигнал от фона (ярких облаков). Этот сигнал вреден, так как создаёт дополнительный фотонный шум. Следовательно, оптимальным является

именно время накопления 1 мс. В инструментах LIS и OTD кадровая частота составляет 500 Гц, что, по-видимому, обусловлено предельными возможностями используемых ПЗС-фотоприёмников. Проблему удалось решить в геостационарном приборе LI, где применение КМОП-матриц позволило поднять кадровую частоту до 1000 Гц.

Следует отметить, что кадровая частота должна быть согласована со временем накопления сигнала. Рассмотрим, например, кадровую частоту 667 Гц, соответственно, период кадра 1,5 мс. Но время накопления в фотоприёмнике зададим 1 мс. Такие параметры съёмки приведут к наличию «мёртвых интервалов времени»: накопление сигнала текущего кадра уже завершилось, а нового ещё не началось. По данным о времени свечения (рисунок 1.5.), около 30% импульсов имеют длительность только 100...300 мкс. Таким образом, в рассмотренном примере эти импульсы молнии могут быть пропущены, так как в течение 500 мкс сигнал в пикселе не накапливается.

Тем не менее, полностью согласовать время накопления сигнала и кадровую частоту невозможно, так как время считывания сигнала не является бесконечно малым, хотя для современных КМОП-фотоприёмников оно измеряется единицами микросекунд.

2.1.4. Разрядность АЦП фотоприёмника

Минимально необходимая разрядность АЦП определяется отношением сигнала от фона и отблеска. Параметры оптико-электронной системы должны быть подобраны так, чтобы в максимально возможный сигнал от фона был близок к зарядовой ёмкости пикселя фотоприёмника. С учётом спектральной облучённости верхней границы атмосферы $E_{ВГА}(\lambda, h_s)$, альбедо облаков ρ , времени накопления сигнала T и интегральной яркости молнии $B_{молн}$ имеем, что при характерной ширине полосы пропускания $\Delta\lambda=1,7$ нм число градаций сигнала должно быть не менее:

$$N_{\text{АЦП}} = \frac{\rho \cdot E_{\text{ВГА}}(777\text{нм}, 90^\circ) \cdot \Delta\lambda \cdot T}{\pi \cdot B_{\text{молн}}} = \frac{0,8 \cdot 1,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{нм}} \cdot 1,7\text{нм} \cdot 10^{-3}\text{с}}{3,14 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ср}}} = 121 \quad (2.1)$$

Если АЦП фотоприёмника имеет 10 разрядов, получаем, что отблеск с яркостью 5 мкДж/(м²*ср) создает превышение над фоном в 1023/121 ~ 8 уровней АЦП при наилучшей временной фазе и 4 уровня АЦП при наихудшей. Это позволяет не только решать *двоичную* задачу обнаружения молний вида «есть вспышка/нет вспышки», но и получать данные об их *распределении* по яркости.

В приведённом расчёте описана временная фаза свечения отблеска: в наихудшем случае максимум яркости приходится на момент окончания экспонирования снимка N и начала экспонирования снимка N+1. То есть энергия, высвеченная отблеском, поделилась поровну между двумя снимками, как и сигнал. Очевидно, что временная фаза никак не влияет на фоновый сигнал, так как яркость облаков постоянна во времени на промежутках порядка 1 мс.

Фотоприёмники с 8-разрядным АЦП ($2^8 = 256$ градаций сигнала) позволяют решать задачу обнаружения вспышек. Но для качественного сбора данных об яркостном распределении молний требуется фотоприёмник с разрядностью АЦП не менее 10 ($2^{10} = 1024$ уровня квантования сигнала) [34]. Возможность построения яркостного распределения отблесков сильно повысит научную ценность создаваемой аппаратуры.

2.1.5. Необходимость бинирования пикселей

В случае, если формат КМОП-фотоприёмника достаточно большой, а размер его пикселя маленький (менее 20 мкм), может иметь место необходимость цифрового бинирования. С одной стороны, это позволит поднять соотношение сигнал/шум (например, при усреднении сигнала с 9 пикселей ОСШ возрастает в 3 раза). Кроме того, бинирование пикселей позволит увеличить быстродействие алгоритма обработки снимков, так как размер изображений уменьшится в десятки или даже сотни раз.

Кроме того, бинирование пикселей можно сделать гибким, то есть при малой зашумлённости фона усреднение производится по окну малого размера (2*2 или 4*4 пикселя), что позволяет улучшить пространственное разрешение и точность географической привязки выявляемых отблесков.

Также работа ПАК ДМ в режиме без бинирования позволит производить съёмку местности в режиме «координатной привязки». В этом случае камера ОЭБ работает как классическая камера ДЗЗ с пространственным разрешением ~ 700 м, выявление вспышек на снимках не производится. Анализ особенностей местности на изображениях и их сопоставление с данными по углам ориентации КА позволит выполнять уточнение координатной привязки данных.

2.1.6. Вероятность обнаружения отблеска

Целевой характеристикой ПАК ДМ является вероятность обнаружения вспышки молнии с характерной яркостью. В свою очередь, эта величина определяется отношением сигнал/шум на получаемых снимках. Кроме того, важной характеристикой является вероятность ложного обнаружения отблеска. В существующих аналогах вероятность обнаружения отблеска составляет 70-90%. Примем для последующих расчётов, что вероятность обнаружения истинного отблеска характерной яркости должна составлять не менее 70% в наихудших условиях. Также примем, что вероятность обнаружения ложного отблеска на снимке не должна превышать 1%, что позволяет оценить поток ложных отблесков как ~ 10 штук в секунду.

2.2. Исследование возможных схем построения

2.2.1. Классическая схема

Рассмотрим сначала тривиальную схему построения оптико-электронного блока ПАК ДМ. Здесь узкополосный интерференционный светофильтр размещается вплотную к матричному фотоприёмнику, как показано на рисунке 2.1. Исходя из опыта создания детекторов молний и оценок сигнала, относительное отверстие объектива должно быть не менее $1/2$. Следовательно,

полуугол схождения пучка составит $\arctg(1/4) = 14$ градусов. Для светофильтров с полосой пропускания 1,5...2 нм это недопустимо много: сдвиг центра полосы пропускания составит не менее 10 нм, следовательно, триплет молнии попадёт в зону подавления пропускания. Качественно картина искажения спектра пропускания показана на рисунке 2.1. Отметим, что такой же результат будет получен при установке светофильтра на входном зрачке. Таким образом, объективы классических схем не подходят для решения нашей задачи, в аналогах ПАК ДМ данная схема также не используется.

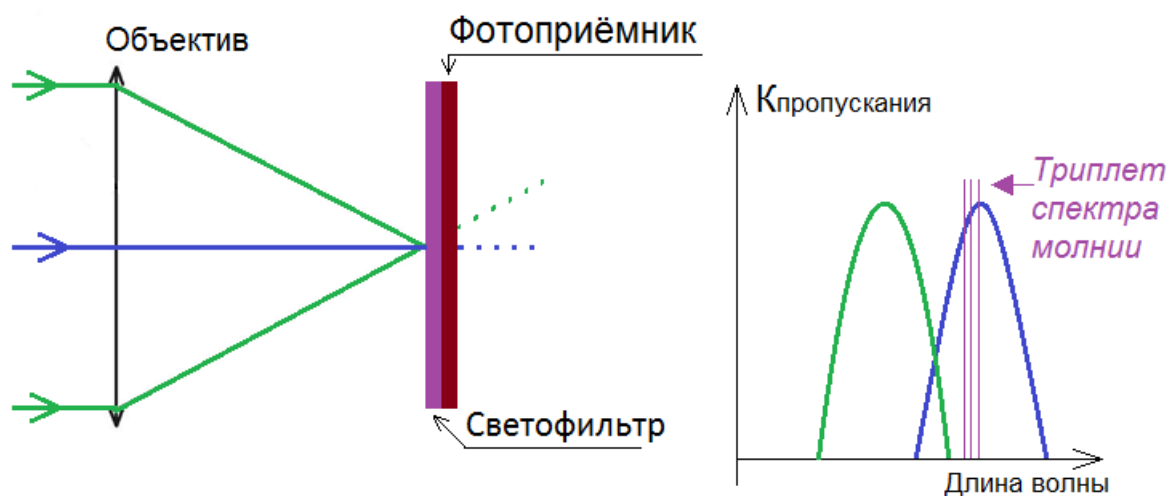


Рисунок 2.1. Неправильная работа узкополосных интерференционных светофильтров в пучках с большим углом схождения. Синий луч падает нормально к светофильтру, а зелёный – под углом (цвета даны для удобства, на самом деле спектр света одинаков). Видно, что искажённое пропускание светофильтра для косых лучей не позволяет попасть на фотоприёмник свету, порождённому отблеском молнии.

Также в объективе классической схемы светофильтр может размещаться на входном зрачке. Но, с учётом особенностей узкополосного светофильтра, поле зрения будет ограничено значением $2\omega = 8...10$ градусов (соответствует полосе захвата 60...70 км). Достижение размера кадра $\sim 500 \times 500$ км возможно только при установке нескольких камер «веером», что увеличивает массогабаритные характеристики и порождает сложные задачи сопряжения данных от нескольких камер.

2.2.2 Схема с расширителем пучка

Рассмотрим оптическую схему с расширителем пучка. Данное конструктивное решение легло в основу объектива для прибора GLM [35]. На рисунке 2.2. представлен принципиальный ход лучей в объективе подобного рода.

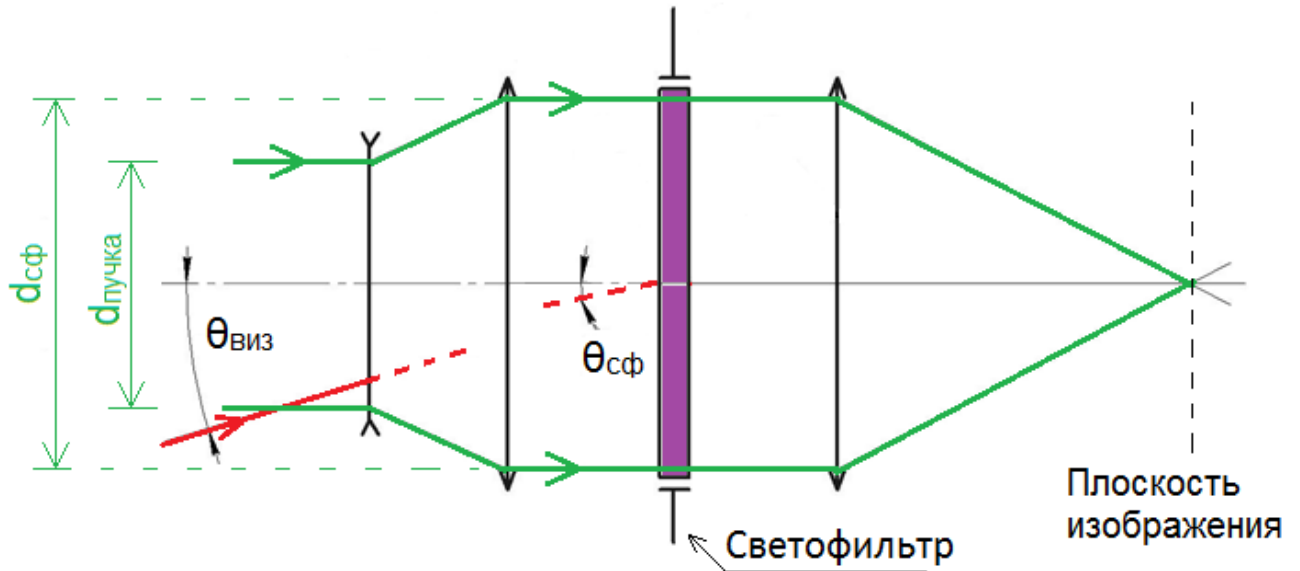


Рисунок 2.2. Ход лучей в объективе с расширителем пучка

Из рисунка 2.2. видно, что угол падения луча на светофильтр $\theta_{сф}$ меньше угла визирования $\theta_{виз}$. С учётом линейного увеличения Γ расширителя пучка связь между углами описывается уравнением:

$$\frac{tg(\theta_{виз})}{tg(\theta_{сф})} = \Gamma = \frac{d_{сф}}{d_{пучка}} \quad (2.2)$$

Откуда имеем:

$$d_{сф} = \Gamma \cdot d_{пучка} = \frac{tg(\theta_{виз})}{tg(\theta_{сф})} \cdot d_{пучка} = \frac{tg(\theta_{виз})}{tg(\theta_{сф})} \cdot \left(\frac{D}{f}\right) \cdot f \quad (2.3)$$

Анализируя формулу (2.3), можно видеть, что при уменьшении максимально допустимого угла $\theta_{сф}$ возрастает требуемый диаметр светофильтра $d_{сф}$. В свою очередь, он ограничен двумя факторами: предельным размером заготовки, при котором возможно обеспечить однородное пропускание по всей площади светофильтра и массогабаритными ограничениями оптической системы.

2.2.3. Двухканальная схема

Одним из вариантов построения ПАК ДМ может являться двухканальная схема. Практически она может быть реализована либо в виде двух камер, наблюдающих один и тот же сюжет, либо в виде объектива со светоделителем и двумя фотоприёмниками. На рисунке 2.3. показан пример построения такой схемы.

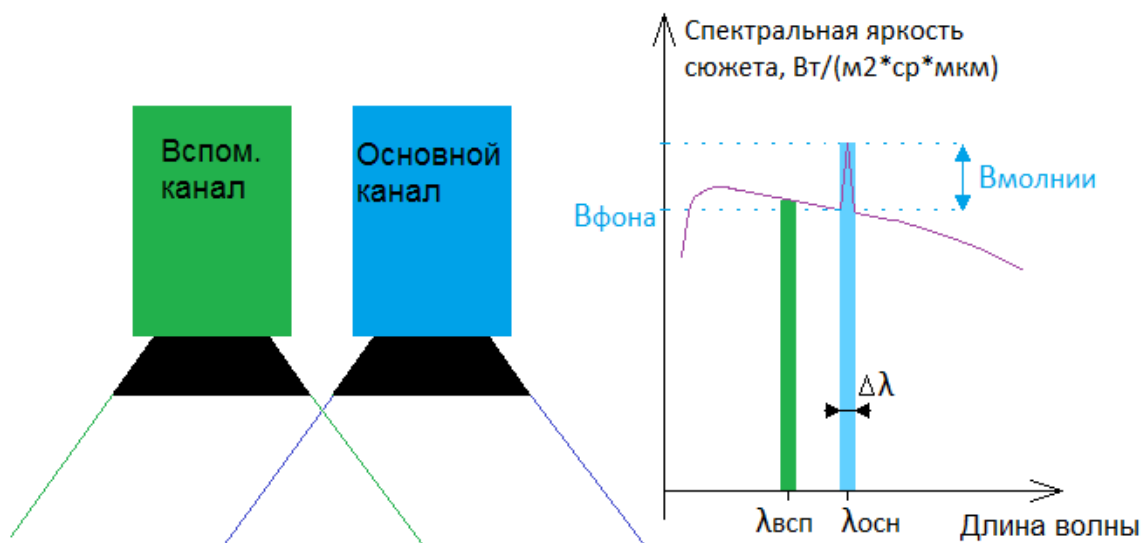


Рисунок 2.3. Принцип работы двухкамерной схемы. В основном канале яркость сцены $V_{сцены}(\lambda_{осн})$ больше, чем во вспомогательном $V_{сцены}(\lambda_{всп})$, так как $V_{фон}(\lambda_{осн}) = V_{фон}(\lambda_{осн}) + V_{молнии}(\lambda_{осн})$. Для вспомогательного канала имеем, что $V_{сцены}(\lambda_{всп}) = V_{фон}(\lambda_{всп})$, так как яркость молнии $V_{молнии}(\lambda_{всп}) = 0$.

Рассмотрим пример возможного построения двухканальной системы. На общей платформе установлены две камеры с параллельными оптическими осями и параллельно расположенными столбцами матриц. Расстояние между ними много меньше проекции пикселя (1 метр против 5 км). Следовательно, можно считать, что изображения попиксельно совмещены. Пусть на одной камере установлен светофильтр для основного диапазона длин волн $777,4 \pm 1$ нм, а на второй – для вспомогательного, например, 750 ± 1 нм. При такой длине волны вспомогательного канала вспышка молнии не видна. Но в то же время альбедо облаков (или земной поверхности) и спектральную плотность потока излучения

от Солнца можно принять одинаковыми для длин волн 750 нм и 777,4 нм. Тогда при одинаковой ширине диапазонов $\Delta\lambda=2$ нм получим для пикселя (i,j) на каждой из двух матриц:

- 1) Если во фрагменте сцены, соответствующего пикселю (i,j) , нет вспышки, то ожидаемый сигнал будет *одинаковым* для обеих камер, так как альbedo сцены не должно быть существенно разным для длин волн 777,4 нм и 750 нм. Отметим, что реальные величины сигналов для одного и того же пикселя на этих двух изображениях будут отличаться, так как имеет место случайная шумовая составляющая.
- 2) Если во фрагменте сцены, соответствующем пикселю (i,j) , есть вспышка, то ожидаемый сигнал будет *разным* в этих двух камерах. В основном спектральном канале вспышка молнии даёт добавку к сигналу от фона, а во вспомогательном её яркость пренебрежимо мала.

Таким образом, вычитая изображения, мы можем получить снимок, где на почти чёрном фоне видны пятна-вспышки. Однако фон будет неоднородным, так как вычитание снимков не избавит от шумовых выбросов. Достоинством данной системы является *одновременность* получения фонового и целевого изображений, тогда как в однокамерной схеме фоновый кадр получается усреднением большого количества *предшествующих* снимков (снятых в разное время). Но, так как кадровая частота ПАК ДМ должна составлять не менее 500 Гц, то фон практически не изменится за время 2 мс. Следовательно, эта схема построения в 2 раза проигрывает однокамерной по массе и габаритам и в то же время не создаёт принципиального улучшения качества снимков.

Анализ возможных принципов построения показал, что, однокамерная система, обладающая объективом с расширителем пучка, является наиболее целесообразной для ПАК ДМ.

2.3. Исследование требуемых характеристик фотоприёмника

2.3.1. Общие требования к фотоприёмнику

Задача регистрации молний является весьма сложной вследствие быстроты протекающих процессов и необходимости обнаружения светового пятна-отблеска на ярком фоне, создаваемом облаками. Вследствие этого к КМОП-фотоприёмнику предъявляются следующие требования:

- 1) Кадровая частота при рабочем формате снимка не менее 500 Гц;
- 2) Разрядность встроенного АЦП не менее 10 бит;
- 3) Высокая квантовая эффективность на длине волны 777 нм;
- 4) Большая зарядовая вместимость элемента.

В результате анализа имеющихся фотоприёмников были выбраны следующие изделия, описанные в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Основные характеристики КМОП-фотоприёмников, выбранных для анализа (по данным описаний фотоприёмников [36], [37], [38], [39], [40], [41])

Название		LUPA-1300	LUPA-1300-2	LUPA-3000	MT9M413	GSENSE 2011s
Тип		КМОП				
Производитель		ON Semiconductor			Aptina	Gpixel
Формат, пиксели	ширина	1280	1280	1696	1280	2048
	высота	1024	1024	1710	1024	1152
Кадровая частота при полноформатном снимке, Гц		450	500	485	500	668
Размер снимка при частоте кадров 1000 Гц, пиксели		816*640 или 736*736	864*696 или 768*768	1280*1024	1280*512	2048*768
Размер одиночного пикселя, мкм		14	14	8	12	6,5
Квантовая эффективность на длине волны 777 нм		0,13	0,25	0,24	0,09	0,45
Зарядовая ёмкость одиночного пикселя, тысяч электронов		62,5	30	27	63	16
Разрядность АЦП, бит		10	10	8	10	10

2.3.2 Обзор КМОП-фотоприёмников

В настоящее время всё большую популярность в системах ДЗЗ приобретают КМОП-фотоприёмники. В задаче создания ПАК ДМ они представляют интерес, так как способны совмещать в себе как большой формат изображения, так и высокую кадровую частоту, а также обеспечить гибкость характеристик ПАК ДМ.

Отметим также, что, в отличие от ПЗС-фотоприёмника, КМОП-устройства имеют встроенный АЦП. Соответственно, при создании ОЭБ на основе КМОП-фотоприёмника не возникнет необходимость разработки и изготовления АЦП в виде отдельной ячейки. Это позволит значительно уменьшить габариты оптико-электронного преобразователя блока ОЭБ по сравнению со схемой построения на основе ПЗС-матрицы. Кроме того, АЦП в виде отдельной ячейки требует бóльшей мощности питания, чем преобразователь, встроенный в фотоприёмник. Использование прибора, совмещающего в себе фотоприёмник и АЦП, является прогрессивным решением: как описано в [12], в космическом приборостроении значительные перспективы имеют технологии вида «система на чипе» и «система на печатной плате».

Из таблицы 2.1 видно, что матрица МТ9М413 имеет крайне низкое значение квантовой эффективности 0,09. Парирование этого возможно только поднятием светосилы объектива до технологически реализуемых пределов.

В обзоре характеристик модели молнии установлено, что продолжительность свечения её отблеска не превышает 1 мс. Соответственно, время накопления не должно превышать этой величины, в противном случае будет иметь место бессмысленное накопление фонового сигнала после окончания вспышки. Но кадровая частота должна быть согласована со времени накопления, то есть время накопления должно равняться периоду кадра. В противном случае возможен сценарий, когда вспышка молнии произошла в промежуток времени между окончанием накопления кадра 1 и началом накопления кадра 2. Итак, желательно, чтобы кадровая частота составляла не 500 Гц, а 1000 Гц.

Фотоприёмник LUPA-3000 из рассмотрения исключается, так как АЦП имеет 8-битную разрядность. Недостаточно высокая разрядность АЦП породит трудности, связанные с задачами радиометрических измерений яркости отблесков [34].

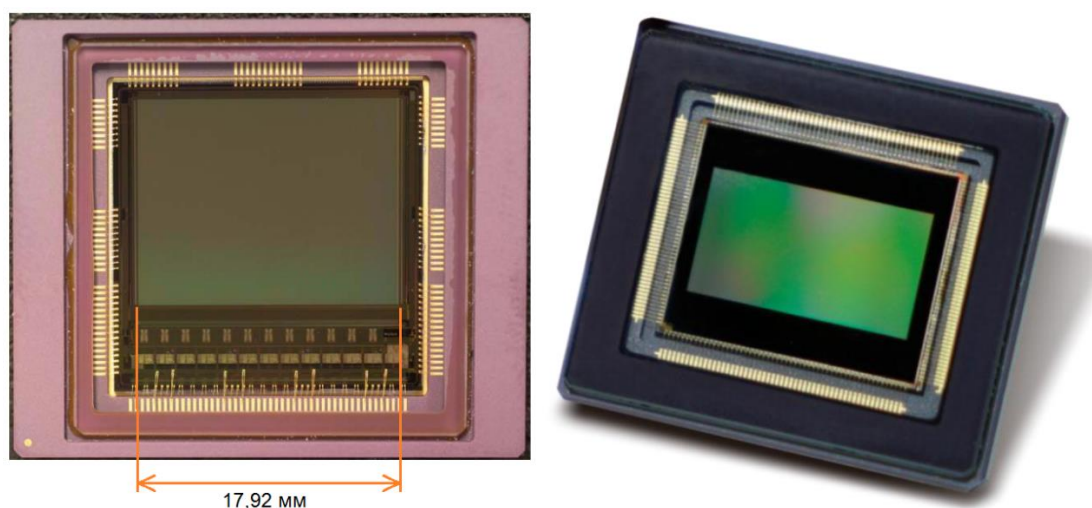


Рисунок 2.4. Внешний вид фотоприёмника LUPA-1300-2 (слева) и GSense2011s (справа) по данным [37], [41].

2.3.3 Реализация гибкости характеристик ПАК ДМ при использовании КМОП-фотоприёмников

Подводя итог анализа фотоприёмников, можно сказать, что оптимальным решением является построение блока ОЭБ на основе фотоприёмника LUPA-1300-2 или GSense2011. Данные фотоприёмники **способны** обеспечить размер изображения порядка **700*700 небинированных пикселей** при кадровой частоте **1000 Гц**. Тогда при формате кадра 768*768 пикселей и проекции 680 метров угловой размер области, обозреваемой рабочей областью фотоприёмника, составит 60*60 градусов. При высоте орбиты 450 км это обеспечивает размер снимка 520*520 км.

При цифровом бинировании 8*8 пикселей реальное пространственное разрешение снимков составит 5,4 км. Поле зрения объектива можно сделать несколько больше 60*60 градусов, тогда уменьшение кадровой частоты позволяет в случае необходимости увеличить угловой размер охватываемой области. Например, при кадровой частоте 783 Гц фотоприёмник LUPA-1300-2 имеет максимальный формат считываемого изображения 1008*816 пикселей, что будет соответствовать размеру кадра 680*550 км (угловой размер кадра 74*63 градуса). Таким образом, при изготовлении объектива с полем зрения 67*67 градусов можно добиться размера кадра 600*600 км при его формате 880*880 небинированных пикселей на кадровой частоте ~700 Гц.

Нужно отметить, что регулируемый размер области считывания в КМОП-фотоприёмнике позволяет добиться гибкости характеристик ОЭБ. Это особенно важно при изучении малоизученных молниевых явлений и при совместной работе с гамма-детектором молний, предназначенном для регистрации явлений TGF. Например, КМОП-фотоприёмник позволяет повысить кадровую частоту до величины 2000-3000 Гц, при этом, естественно, размер кадра уменьшится. Наоборот, при малой яркости фона кадровую частоту можно сделать менее 1000 Гц, что позволит увеличить формат кадра и, следовательно, полосу захвата ПАК ДМ (при должном поле зрения объектива).

Общий принцип реализации гибкости характеристик ПАК ДМ при использовании КМОП-фотоприёмника показан на рисунках 2.5-2.6.

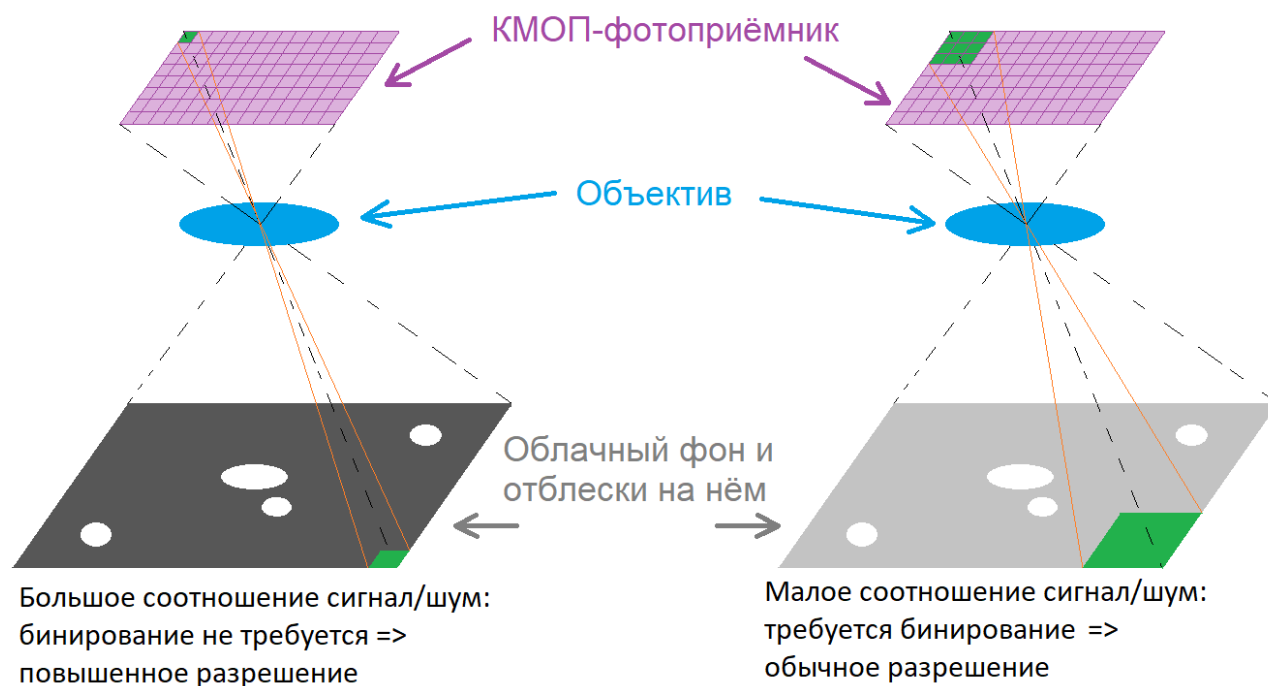


Рисунок 2.5. Реализация гибкости пространственного разрешения ПАК ДМ. При малой яркости фона и, следовательно, большом соотношении сигнал/шум требуемая вероятность обнаружения может быть достигнута при уменьшении кратности бинирования, либо вообще без его использования. Таким образом, при работе не в наихудших условиях съёмки появляется возможность улучшить исходное пространственное разрешение (5 км) как минимум до 2,5 км, что повысит качество и полноту получаемой информации.

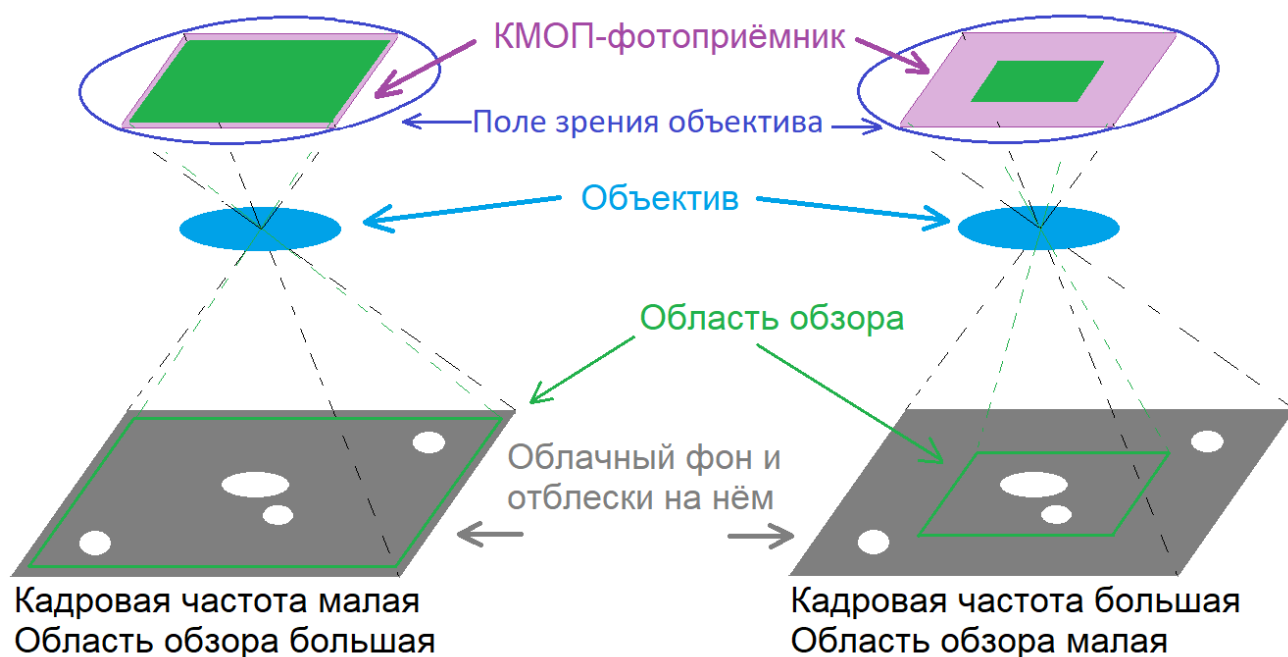


Рисунок 2.6. Реализация гибкости полосы захвата ПАК ДМ. Уменьшение кадровой частоты КМОП-фотоприёмника позволяет повысить формат кадра. При наличии запаса поля зрения объектива реализуется повышение полосы захвата.

2.3.4. Выводы по анализу фотоприёмников

Так как пиксель матрицы GSense 2011 более чем в 2 раза меньше пикселя матрицы LUPA-1300-2, то при одинаковом окне считывания 768×768 пикселей фокусное расстояние объектива для первого фотоприёмника будет в 2 раза меньше, что положительно сказывается на габаритах камеры. В то же время меньшая зарядовая ёмкость пикселя требует сокращения ширины полосы пропускания светофильтра для обеспечения приемлемого соотношения сигнал/шум. Далее назовём матрицу LUPA-1300-2 «фотоприёмник №1», а матрицу GSense2011 - «фотоприёмник №2».

При формате исходного кадра 768×768 пикселей и проекции небинированного пикселя 680 м размер снимка составит 520×520 км (для орбиты 450 км). С учётом возможности размещения ПАК ДМ на МКС получаем, что будет обеспечен обзор широт в диапазоне $-53,9^\circ \dots +53,9^\circ$. Это можно считать приемлемым для наблюдения бóльшей части России, интересной с точки зрения молниевой активности.

2.4. Исследование влияния фотоприёмника

2.4.1. Функция передачи модуляции

Качество любой оптико-электронной системы характеризуется функцией передачи модуляции (ФПМ). Она определяется ФПМ составных частей сквозного оптико-электронного тракта: атмосферой, оптической системой и фотоприёмником. ФПМ системы влияет на уровень искажения (размытия) изображения объекта. Одной из компонент ФПМ системы является ФПМ фотоприёмника. Она, в свою очередь, состоит из геометрической и диффузионной составляющих. Геометрическая ФПМ фотоприёмника обусловлена конечностью размера его пикселя и расположением фоточувствительных ячеек в регулярном порядке. Основной вклад вносит именно геометрическая ФПМ [22]. Как показано в [22] и [42], геометрическая ФПМ фотоприёмника (для 100% коэффициента заполнения пикселя) может быть описана следующим образом:

$$MTF_{\text{геом}}(\nu) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}} \quad (2.4)$$

Где $\nu_N = \frac{1}{2 \cdot \delta}$ – пространственная частота Найквиста при размере пикселя δ , определяется как половина частоты дискретизации фотоприёмника.

Отметим, что реальная геометрическая ФПМ для КМОП-фотоприёмников будет выше, так как коэффициент заполнения пикселя (fill factor) для них составляет не 100%, а 40...60%. С учётом фактических данных по ФПМ высокоскоростных КМОП-фотоприёмников [36], общую ФПМ фотоприёмника можно оценить по формуле (2.5). При этом примем граничные условия: $MTF_{\text{диффузии}}(0) = 1$ и $MTF_{\text{диффузии}}(\nu_N) = 0,8$:

$$MTF_{\text{фпу}}(\nu) = MTF_{\text{геом}}(\nu) \cdot MTF_{\text{диффузии}}(\nu) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}} \cdot \left(1 - 0,2 \cdot \frac{\nu}{\nu_N}\right) \quad (2.5)$$

С учётом бинирования пикселей 8*8 имеем, что ФПМ фотоприёмника на частоте 0,125 от частоты Найквиста будет не менее 0,97. Для работы с улучшенным пространственным разрешением (бинирование 6*6 или 4*4) ФПМ фотоприёмника составит не менее 0,93. Таким образом, установлено, что для обнаружения молний ФПМ фотоприёмника не оказывает значительного влияния.

2.5. Исследование параметров светофильтра

2.5.1. Определение ширины полосы пропускания

Так как диапазон линии свечения молнии составляет 0,35 нм, то ширина полосы пропускания светофильтра должна быть не менее этой величины.

Светофильтр, способный выделить такую узкую рабочую спектральную полосу должен быть построен на основе интерференционного покрытия. Спектральное пропускание такого оптического изделия в существенной степени зависит от угла падения лучей. Имеет место сдвиг максимума пропускания в коротковолновую область для лучей с ненулевым углом падения. Пример подобного искажения приведён на рисунке 2.7.

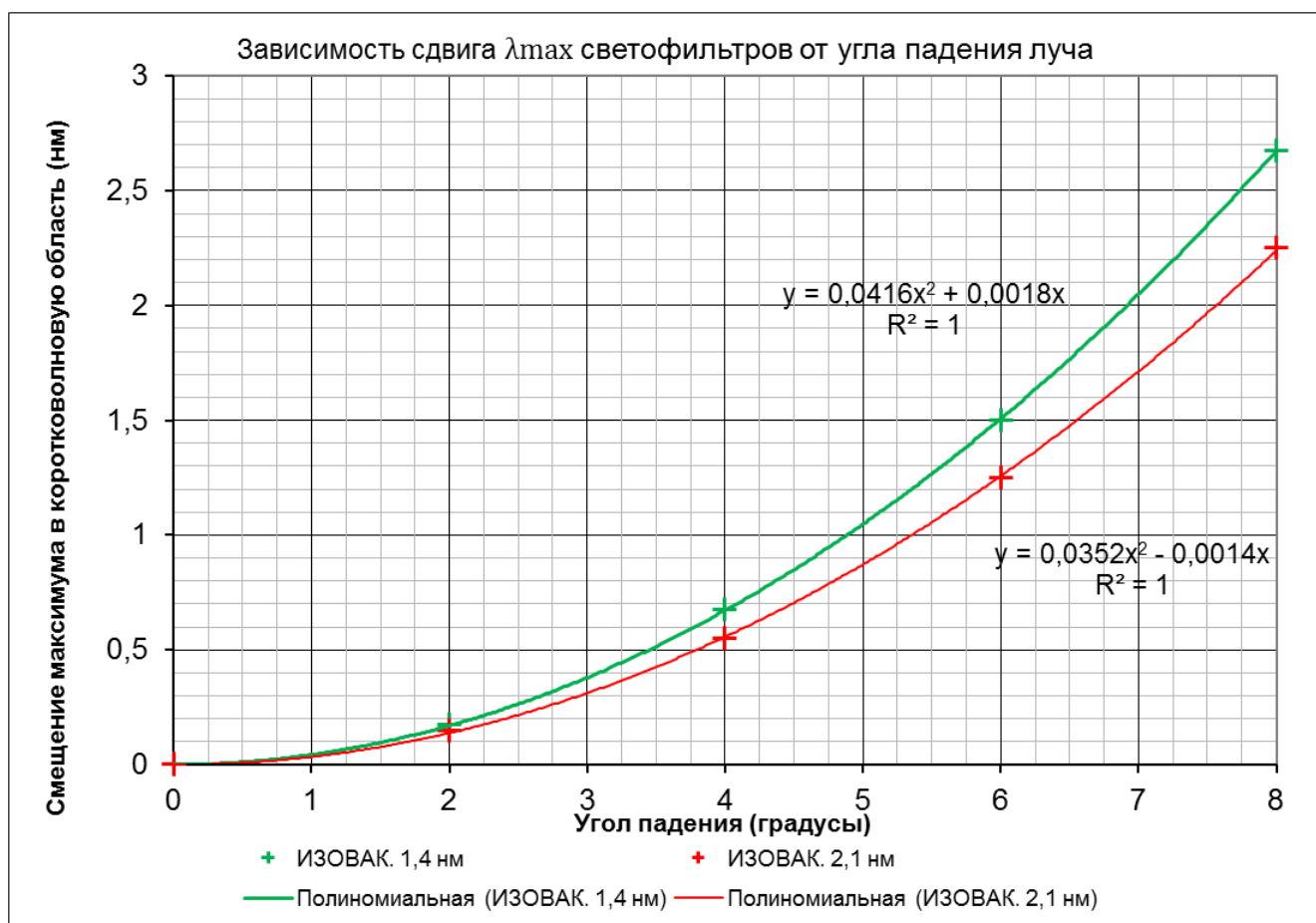


Рисунок 2.7. Зависимости сдвига центра полосы пропускания светофильтра от угла падения луча, предоставленные для двух светофильтров: с шириной полосы пропускания $\Delta\lambda_{0,5} = 1,4$ нм и $\Delta\lambda_{0,5} = 2,1$ нм. Данные АО «ИЗОВАК».

Для более рационального использования полосы пропускания центральная длина волны светофильтра при нормальном падении лучей должна быть не 777,4 нм, а несколько больше. Принцип выбора центра полосы пропускания показан на рисунке 2.8.

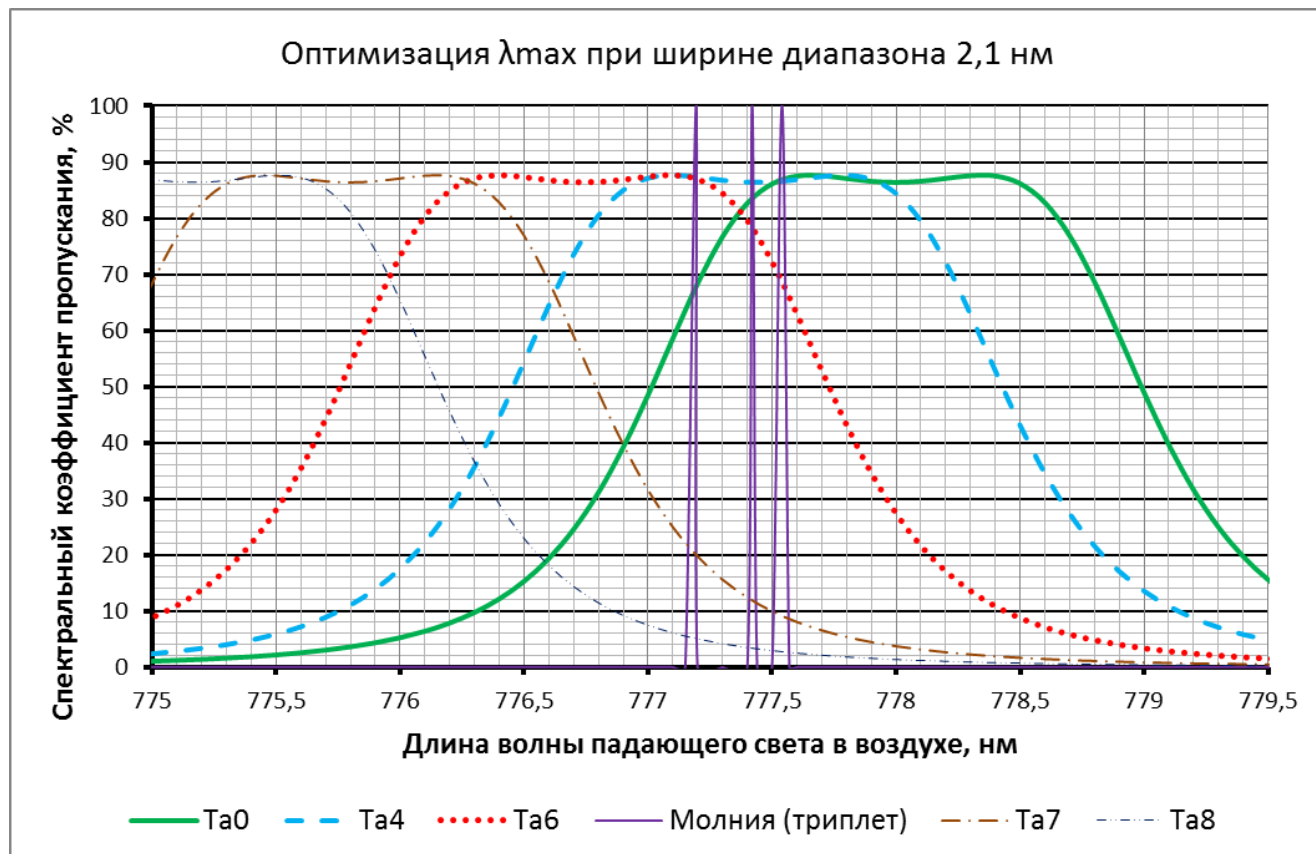


Рисунок 2.8. Принцип оптимизации длины волны центра полосы пропускания λ_{\max} . Она подбирается таким образом, что при угле падения $\theta=0$ «колокол» полосы пропускания прижимается к левому краю спектра молнии, а при $\theta=\theta_{\max}$ наоборот, «колокол» полосы пропускания прижимается к правому краю спектра молнии. Из рисунка видно, что при угле падения 6 градусов центральная длина волны смещается влево на 1,25 нм. Следовательно, для светофильтра с $\Delta\lambda_{0,5}=2,1$ нм центральная длина волны при $\theta=0$ должна быть не 777,4 нм, а 778 нм.

По данным АО «ИЗОВАК», характерный сдвиг центра полосы пропускания под действием температуры составляет $K_t = +0,01$ нм/°С. Отметим также, что в оценках необходимо учесть «дрожание» спектральной характеристики светофильтра вследствие погрешностей изготовления. Примем, что погрешность положения каждого края «колокола» составляет $\Delta\lambda_{\text{края}} = 0,1$ нм.

Также при определении допусков на ширину полосы пропускания необходимо оставить запас с каждой стороны $\Delta\lambda_{\text{запас}} = 0,1$ нм. Это целесообразно, так как иначе при максимальном сдвиге «колокола» коэффициент пропускания триплета упадёт до 0,5. В случае же появления $\Delta\lambda_{\text{запас}}$ пропускание триплета будет не менее 0,7 даже при максимальном сдвиге спектра пропускания.

Определим максимально допустимое смещение длины волны вследствие ненулевого угла падения $\Delta\lambda_{\text{угол}}$ как:

$$\Delta\lambda_{\text{угол}} = \Delta\lambda_{0,5} - \Delta\lambda_{\text{мол}} - \Delta\lambda_{\text{темп}} - 2 \cdot \Delta\lambda_{\text{запас}} - 2 \cdot \Delta\lambda_{\text{края}} \quad (2.6)$$

Где:

$\Delta\lambda_{\text{мол}} = 0,35$ нм – ширина спектра молнии

$\Delta\lambda_{\text{темп}} = 2 \cdot K_t \cdot \Delta T = 2 \cdot 0,01 \cdot 5 = 0,1$ нм – сдвиг центра полосы пропускания под действием температурных колебаний светофильтра

Исходя из этого, можно определить центр полосы пропускания λ_{max} при нормальном падении лучей по формуле (2.7):

$$\lambda_{\text{max}} = \lambda_{\text{молнии}} + \frac{\Delta\lambda_{\text{угол}}}{2} \quad (2.7)$$

Где:

$\lambda_{\text{молнии}} = 777,4$ нм – центр спектрального триплета молнии

Построим зависимости центра полосы пропускания и максимально допустимого угла падения от ширины полосы пропускания светофильтра (рисунки 2.9- 2.10)

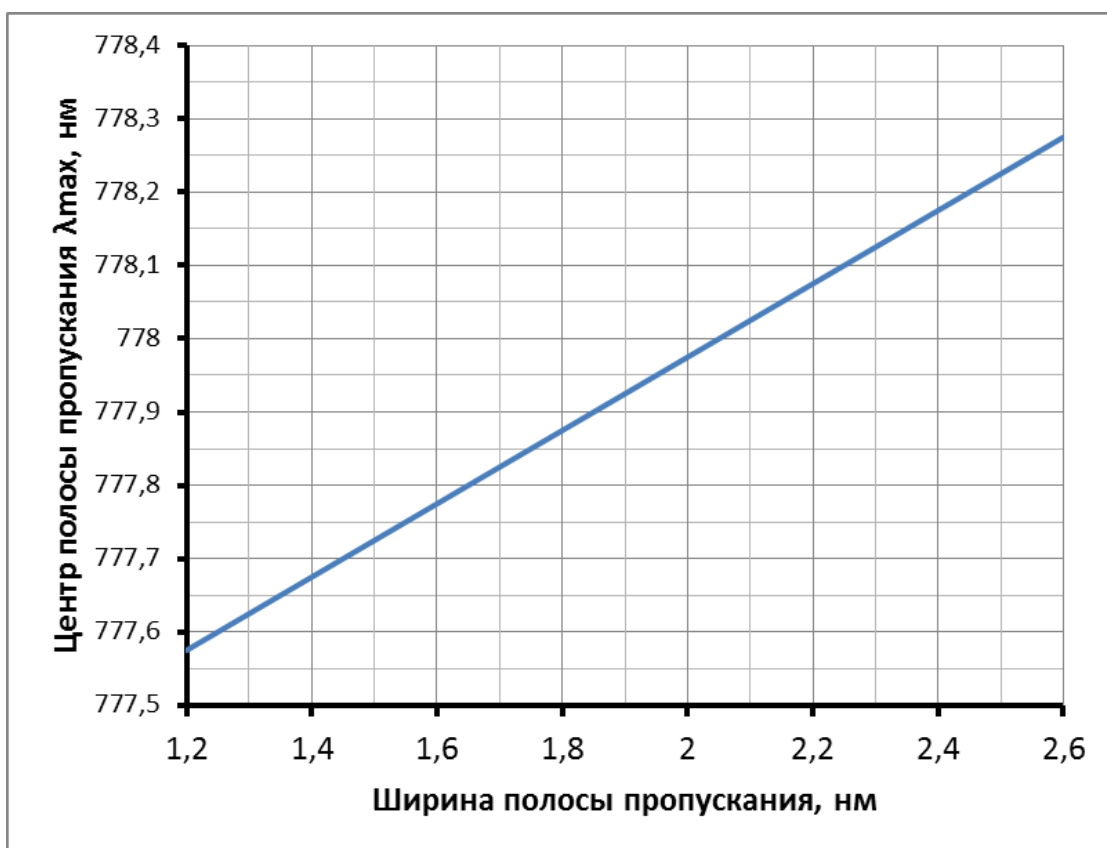


Рисунок 2.9. Зависимость центра полосы пропускания от ширины полосы пропускания светового фильтра.

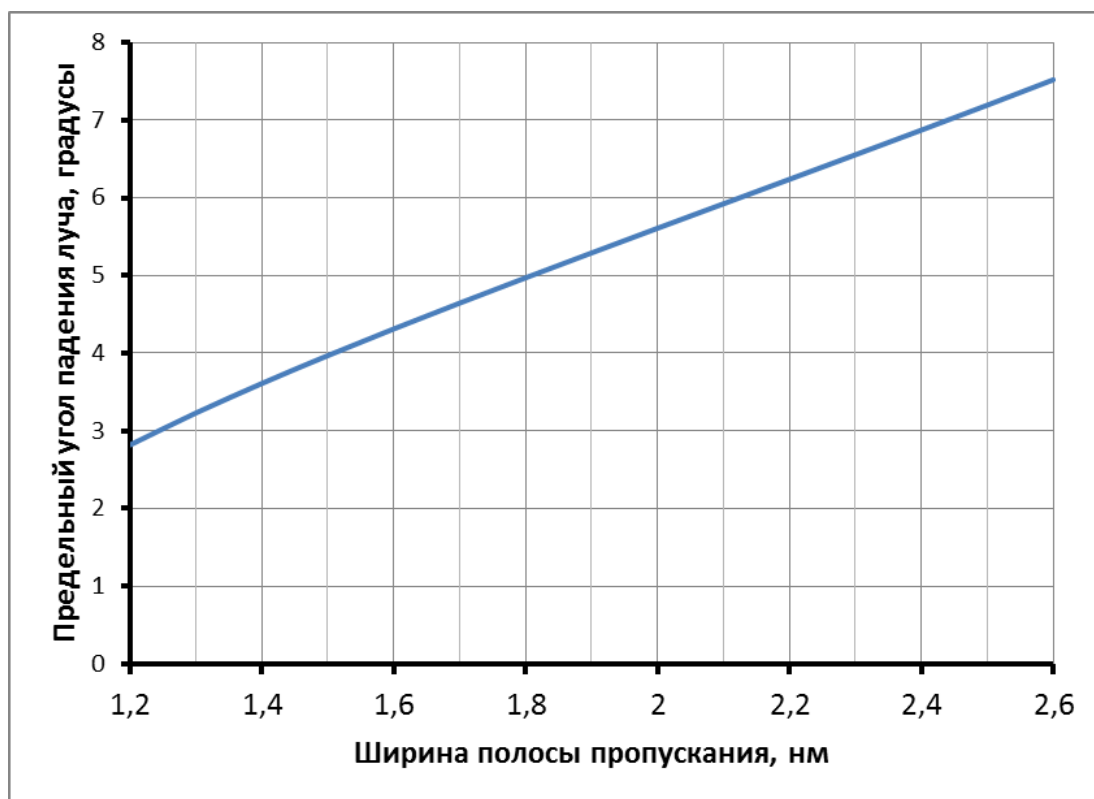


Рисунок 2.10. Зависимость допустимого сдвига центра полосы пропускания светового фильтра $\Delta\lambda_{\text{угол}}$ от её ширины по уровню 0,5.

2.5.2. Диаметр светофильтра

Описанные требования к углу падения луча порождают задачу определения диаметра светофильтра. Как уже упоминалось,

$$d_{\text{сф}} = \Gamma \cdot d_{\text{пучка}} = \frac{\text{tg}(\theta_{\text{виз}})}{\text{tg}(\theta_{\text{сф}})} \cdot d_{\text{пучка}} = \frac{\text{tg}(\theta_{\text{виз}})}{\text{tg}(\theta_{\text{сф}})} \cdot \left(\frac{D}{f}\right) \cdot f \quad (2.8)$$

Где

$\theta_{\text{виз}}$ – предельный угол визирования;

$\theta_{\text{сф}}$ – предельно допустимый угол падения луча на светофильтр.

Вопрос задания угла $\theta_{\text{виз}}$ требует отдельного рассмотрения. Допустим, этот угол задаётся как максимально возможный угол визирования в квадратном кадре. Естественно, что ему соответствуют угловые точки квадрата. При «базовой» области охвата поле $\varphi^* \varphi = 60^* 60$ градусов угол $\theta_{\text{виз}}$ определяется как:

$$\theta_{\text{виз}} = \text{arctg} \left(\sqrt{2} \cdot \text{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right) = \text{arctg} \left(\sqrt{2} \cdot \text{tg}(30^{\circ}) \right) = 39,2^{\circ} \quad (2.9)$$

Следует отметить, что угол визирования, больший $\varphi=30$ градусов, в нашем случае имеют лишь четыре небольшие зоны по углам кадра, показанные на рисунке 2.11.

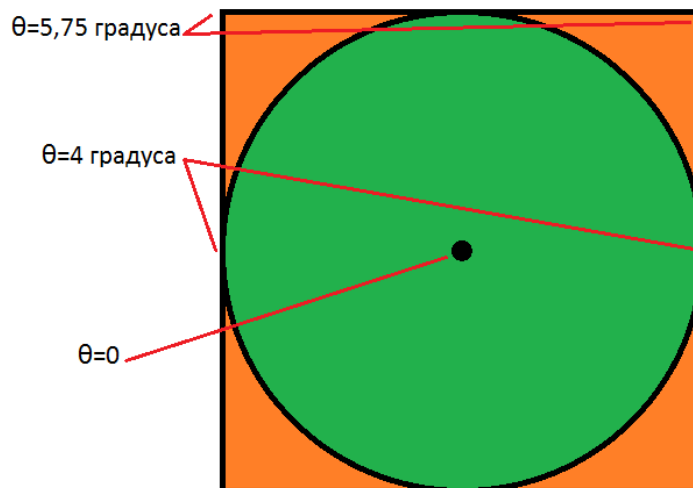


Рисунок 2.11. Зависимость угла падения луча на светофильтр от положения точки кадра. В данном примере угол падения луча для середины стороны кадра составляет 4 градуса. Оранжевым цветом показаны зоны поля зрения с углом падения луча на светофильтр, превышающим 4 градуса.

Описанные угловые зоны занимают долю площади $\frac{4 \cdot r^2 - \pi \cdot r^2}{4 \cdot r^2} = 1 - \frac{\pi}{4} = 21\%$ от охватываемой области. Для оптимизации размера светофильтра можно пренебречь падением коэффициента пропускания триплета молнии в этих зонах. Тогда определим максимальный угол визирования как половину углового размера стороны кадра φ . Имеем для диаметра светофильтра:

$$d_{\text{сф}} = \frac{\operatorname{tg}\left(\frac{\varphi}{2}\right)}{\operatorname{tg}(\theta_{\text{сф}})} \cdot \left(\frac{D}{f}\right) \cdot f \quad (2.10)$$

Построим зависимости необходимого диаметра светофильтра $d_{\text{сф}}$ от ширины полосы пропускания $\Delta\lambda_{0,5}$ для разных относительных отверстий D/f и фокусных расстояний f объектива. Фокусные расстояния подбираются так, чтобы обеспечить формат кадра 768×768 небинированных пикселей при области охвата 60×60 градусов. Для вариантов построения ПАК ДМ с фотоприёмниками №1 и №2 оно составит 9,31 и 4,32 мм соответственно.

Отметим разными цветами области с нереализуемыми, труднореализуемыми и реализуемыми в технологическом отношении характеристиками светофильтра. К первым относятся светофильтры с диаметром более 60 мм и шириной полосы пропускания менее 1,4 нм. К второй группе относятся светофильтры с диаметром 50...60 мм и шириной полосы пропускания 1,4...1,7 нм. Соответственно, выбранному сочетанию характеристик светофильтра должна соответствовать третья, зелёная область графика.

Анализируя график (рисунок 2.12), можно сделать вывод, что при относительном отверстии $D/f = 1/1,6$ диаметр светофильтра (СФ) должен составлять не менее 40 мм при ширине полосы пропускания 1,75 нм. В случае увеличения полосы пропускания до 2 нм при том же D/f допускается уменьшение размера светофильтра до 34 мм. Показанные графики фактически являются набором сечений графика-поверхности функции двух переменных $d_{\text{сф}}\left(\Delta\lambda_{0,5}, \frac{D}{f}\right)$ при разных значениях D/f . На рисунке 2.13 показан общий трёхмерный график этой функции.

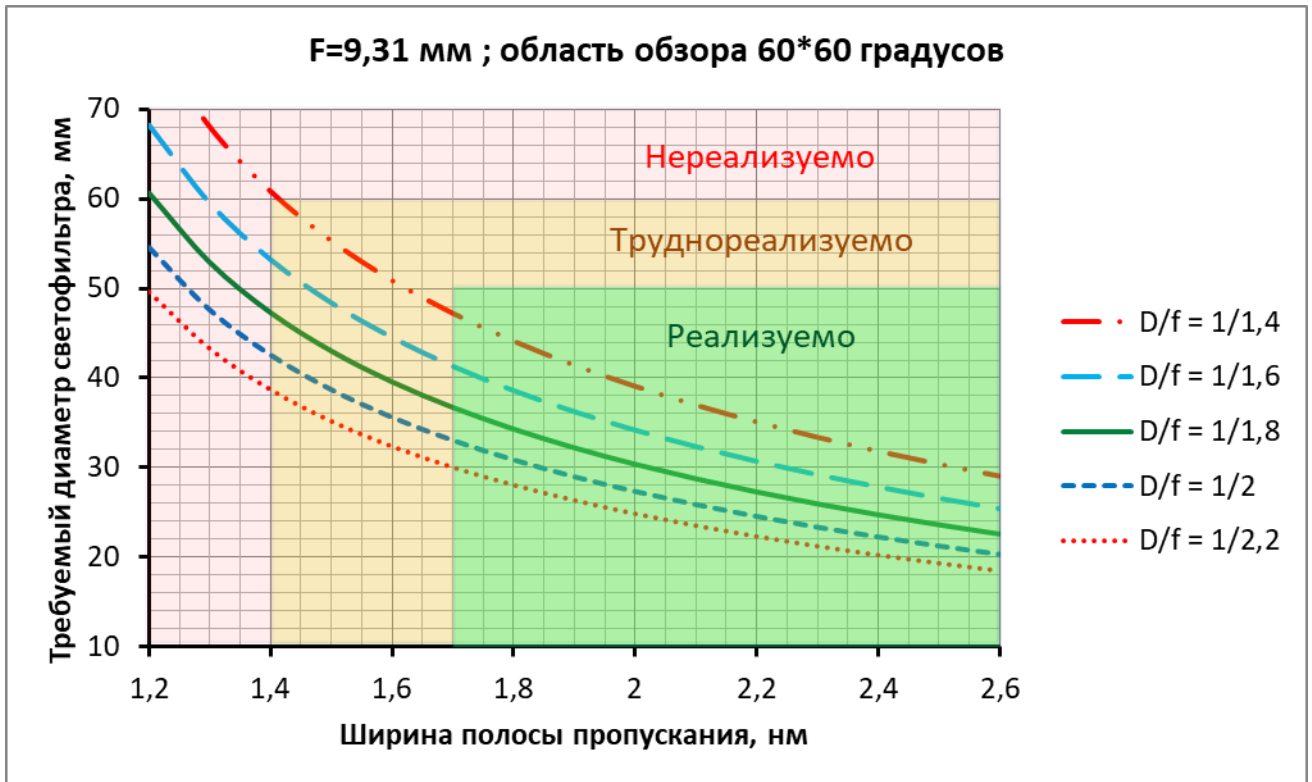


Рисунок 2.12. Зависимости требуемого диаметра светофильтра от ширины его полосы пропускания при разных относительных отверстиях объектива с фокусным расстоянием 9,31 мм. Угловой размер кадра 60*60 градусов.

Зависимость диаметра СФ от полосы пропускания и отн. отверстия
F = 9.31 мм, 60x60 градусов

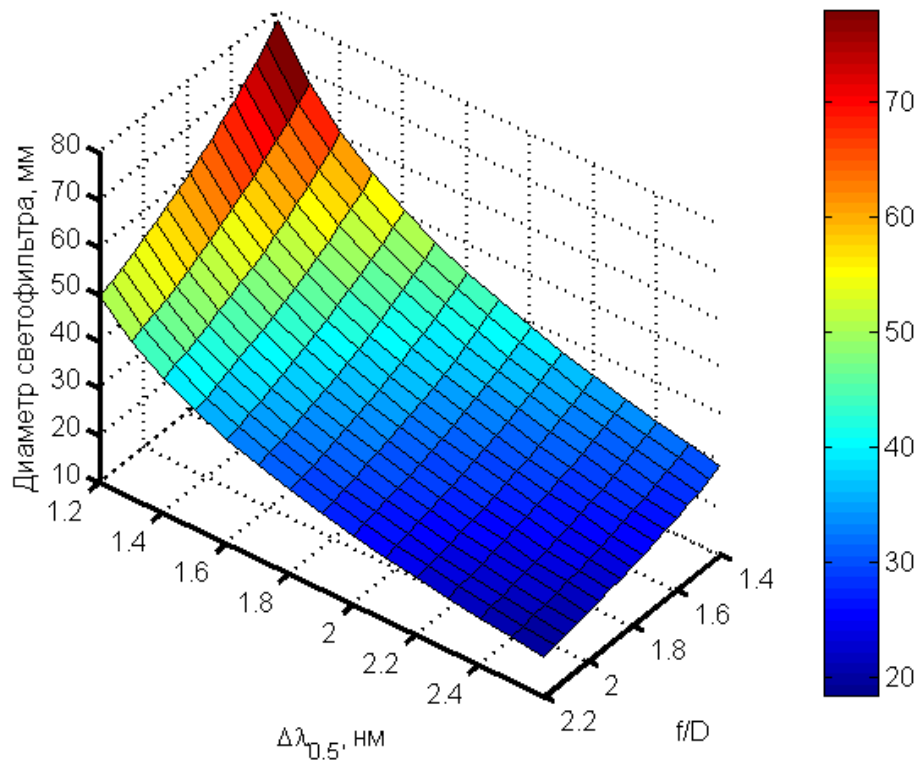


Рисунок 2.13

Построим аналогичный график на рисунке 2.14 для семейства объективов с фокусным расстоянием 4,32 мм и различными D/f . Полученные графики фактически является набором сечений графика-поверхности функции двух переменных $d_{сф} \left(\Delta\lambda_{0,5}, \frac{D}{f} \right)$ при разных значениях D/f . На рисунке 2.15 показан общий трёхмерный график этой функции.

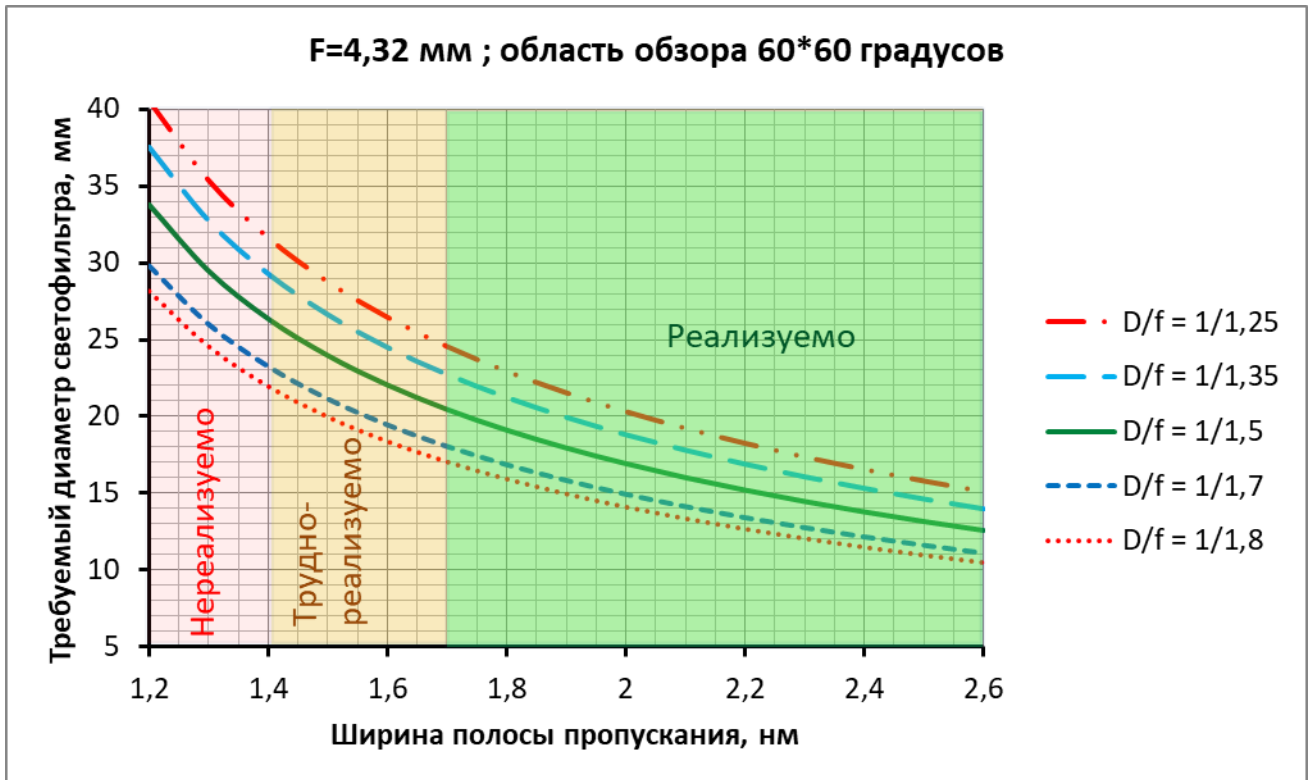


Рисунок 2.14. Зависимости требуемого диаметра светофильтра от ширины его полосы пропускания при разных относительных отверстиях объектива с фокусным расстоянием 4,32 мм. Угловой размер кадра 60*60 градусов.

Зависимость диаметра СФ от полосы пропускания и отн. отверстия
 $F = 4.32 \text{ мм}, 60 \times 60 \text{ градусов}$

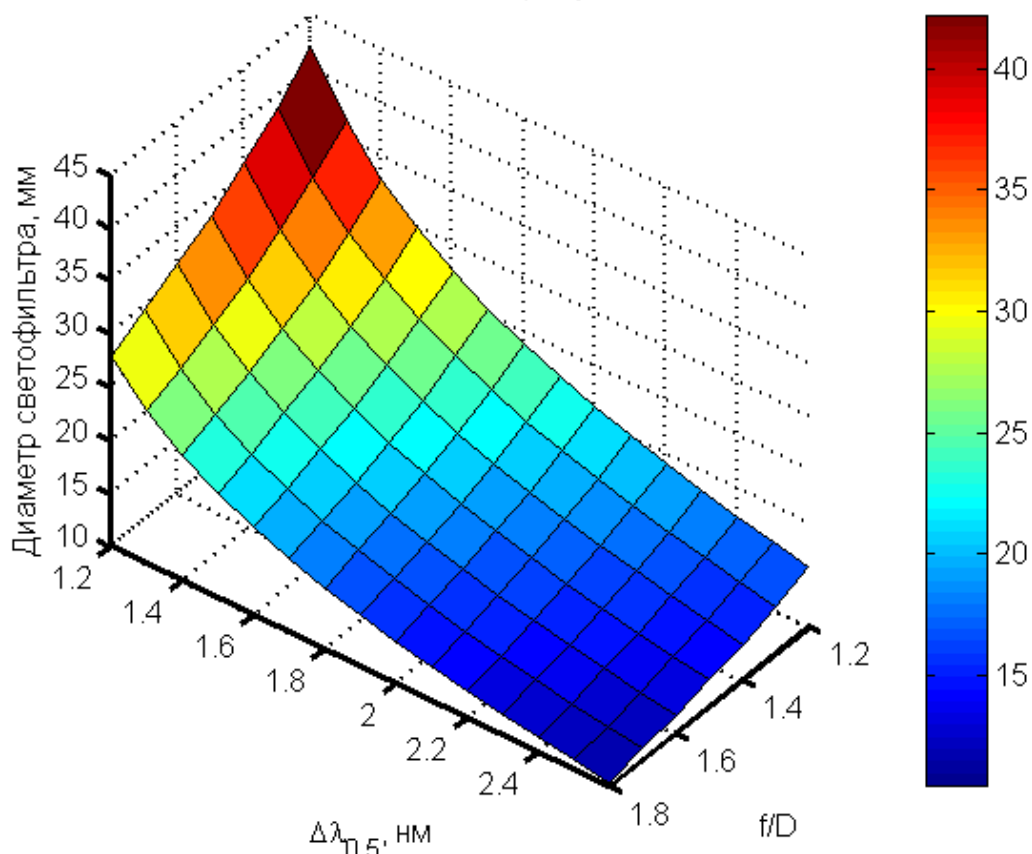


Рисунок 2.15.

Анализируя график, можно сделать вывод, что при относительном отверстии $D/f = 1/1,5$ диаметр светофильтра должен составлять не менее 20 мм при ширине полосы пропускания 1,75 нм. В случае увеличения полосы пропускания до 2 нм при том же D/f допускается уменьшение размера светофильтра до 17 мм.

2.5.3. Анализ падения пропускания светофильтра на краях кадра

С учётом полученных в п. 2.5.2 результатов можно построить зависимость коэффициента пропускания вспышки светофильтром от угла падения луча и учесть это при моделировании снимков. Пусть центр полосы пропускания светофильтра сдвинулся на величину $\Delta\lambda$. Из рисунка (сдвиг спектра) видно, что коэффициент пропускания для триплета молнии при этом упадёт, произойдёт «срез» триплета наклонной частью колоколообразного спектра пропускания.

Однако на сигнале от фона это никак не скажется, так как при $\Delta\lambda=0,5\dots1,5$ нм спектральная яркость облаков почти не изменится. Таким образом, можно ввести величину поправочного коэффициента $K_{\text{угл}}(\theta_{\text{сф}})$, определяемого как:

$$k_{\text{угл}}(\theta) = \frac{U_{\text{вспышки}}(\theta, k_{\text{фаз}} = 1)}{U_{\text{макс_вспышки}}(k_{\text{фаз}} = 1)} \quad (2.11)$$

Где:

$U_{\text{вспышки}}(\theta, k_{\text{фаз}} = 1)$ – сигнал от отблеска в пикселе, соответствующем углу падения луча θ ;

$U_{\text{макс_вспышки}}(k_{\text{фаз}} = 1)$ – максимально возможный сигнал от отблеска

На рисунке 2.16 показан график зависимости поправочного коэффициента для трёх вариантов ширины полосы пропускания светофильтра.

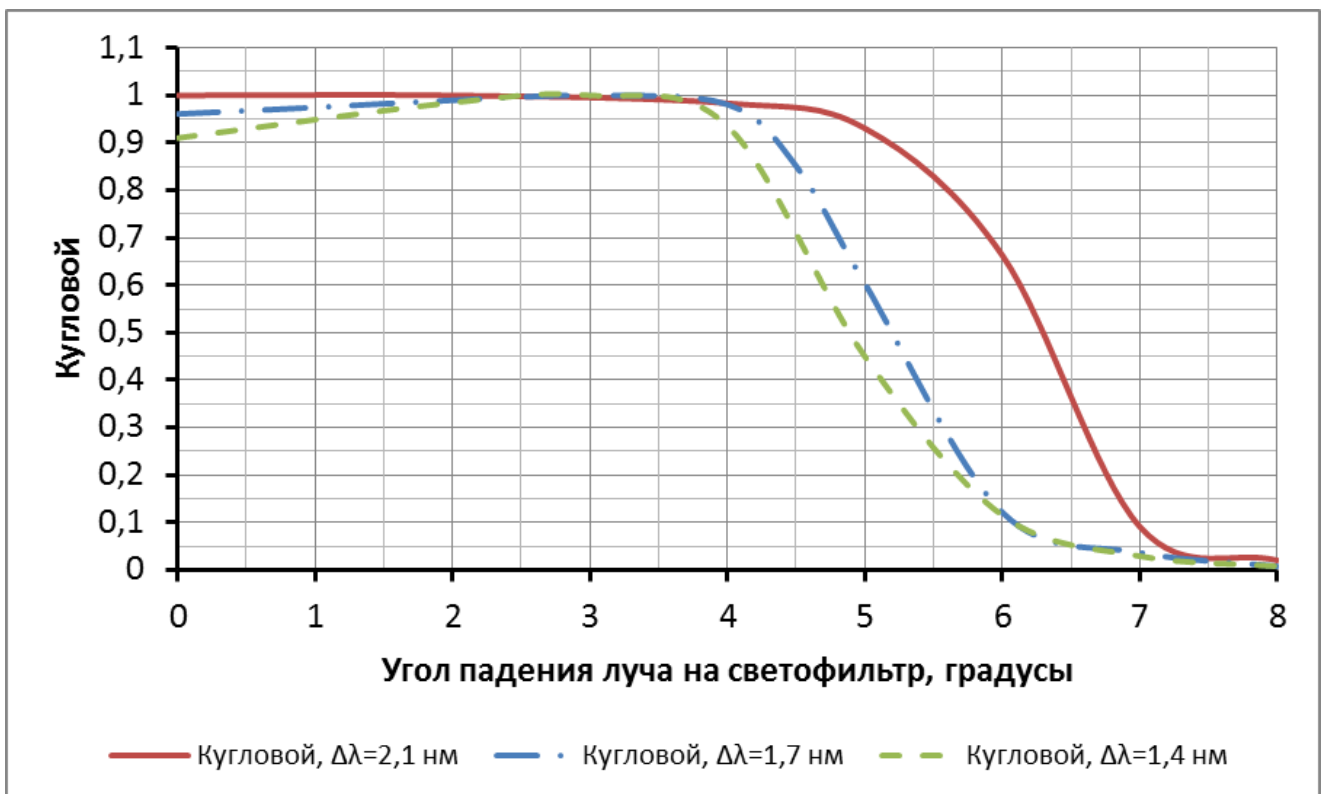


Рисунок 2.16. Зависимость поправочного коэффициента $K_{\text{угл}}$ от угла падения луча на светофильтр для $\Delta\lambda_{0,5} = 1,4; 1,7$ и $2,1$ нм.

При определении зависимости $K_{\text{угл}}(\theta_{\text{сф}})$ учитывалось, что энергии каждой из трёх линий триплета вспышки не одинаковые, а соотносятся как 45%, 33% и 22%.

2.6 Исследование параметров объектива

2.6.1. Определение относительного отверстия

В предыдущем разделе была установлена взаимосвязь полосы пропускания светофильтра, его диаметра и относительного отверстия объектива. При этом сама величина необходимого относительного отверстия не вычислялась. Определим её требуемое значение с учётом взаимосвязи характеристик светофильтра и объектива.

Зафиксируем величину ширины полосы пропускания светофильтра $\Delta\lambda_{0,5}$ и будем изменять относительное отверстие объектива D/f . Тогда при превышении некоторого критического значения $(D/f)_{\max}$ фоновый сигнал достигнет величины зарядовой ёмкости фотоприёмника. Это недопустимо ни при каких условиях наблюдения. Очевидно, что при прочих равных условиях он будет максимальным при возвышении Солнца 90 градусов над горизонтом. Более того, не следует допускать превышения 75% от зарядовой ёмкости пикселя. Это связано с двумя факторами: возможным превышением альбедо фона расчётной величины и наличием нелинейности светосигнальной характеристики фотоприёмника в областях больших сигналов. Тогда имеем ограничение сверху на D/f :

$$U_{\text{фона}} \left(\left(\frac{D}{f} \right), \Delta\lambda_{0,5}, h_s = 90^\circ, \rho = 0,8 \right) \leq 0,75 \cdot C_{\text{заряд}} \quad (2.12)$$

В то же время будет нецелесообразно сильно уменьшать значение D/f , так как тогда упадёт не только сигнал от фона, но и сигнал от вспышки. Это приведёт к падению и ключевой характеристики ПАК ДМ: соотношения сигнал/шум. Поэтому введём такое условие на оптимальное значение D/f :

$$0,7 \cdot C_{\text{заряд}} \leq U_{\text{фона}} \left(\left(\frac{D}{f} \right), \Delta\lambda_{0,5}, h_s = 90^\circ, \rho = 0,8 \right) \leq 0,75 \cdot C_{\text{заряд}} \quad (2.13)$$

В свою очередь, сигнал от фона определяется как:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{фона}} \left(\left(\frac{D}{f} \right), \Delta\lambda_{0,5}, h_s, \rho \right) &= \\
 &= \frac{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \tau_{\text{опт}} \cdot \tau_{\text{сф}} \cdot \rho \cdot 1,1 \cdot \Delta\lambda_{0,5} \cdot E_{\text{вга}}(\lambda_{\text{молнии}}) \cdot \eta(\lambda_{\text{молнии}}) \cdot T_{\text{нак}}}{\frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{молнии}}}} \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

Сигнал от вспышки определяется как:

$$\begin{aligned}
 U_{\text{вспышки}} \left(\left(\frac{D}{f} \right), B_{\text{вспышки}} \right) &= \\
 &= \frac{\frac{1}{4} \cdot \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \tau_{\text{опт}} \cdot \tau_{\text{сф}} \cdot \pi \cdot B_{\text{вспышки}} \cdot \eta(\lambda_{\text{молнии}}) \cdot k_{\text{фаз}}}{\frac{h \cdot c}{\lambda_{\text{молнии}}}} \quad (2.15)
 \end{aligned}$$

Где:

$E_{\text{вга}}(\lambda_{\text{молнии}}) = 1377 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{мкм}}$ – спектральная облучённость верхней границы

атмосферы на длине волны $\lambda_{\text{молнии}} = 777,4 \text{ нм}$

$\eta(\lambda_{\text{молнии}})$ – квантовая эффективность фотоприёмника на длине волны $\lambda_{\text{молнии}} = 777,4 \text{ нм}$

$\tau_{\text{опт}}, \tau_{\text{сф}}$ – коэффициенты пропускания объектива и светофильтра соответственно на длине волны $\lambda_{\text{молнии}} = 777,4 \text{ нм}$

$T_{\text{нак}}$ – время накопления сигнала. В нашем случае время считывания пренебрежимо мало, а кадровая частота ν должна быть согласована с периодом кадра, что было обосновано выше. Следовательно, $T_{\text{нак}} = \frac{1}{\nu}$

$B_{\text{вспышки}}$ – интегральная по времени свечения яркость вспышки, Дж/(м²*мкм)

h, c – постоянная Планка и скорость света в вакууме соответственно

$k_{\text{фаз}}$ – коэффициент временной фазы. Изменяется от 0,5 (худшая фаза) до 1 (лучшая фаза)

Множитель 1,1 перед шириной полосы пропускания $\Delta\lambda_{0,5}$ обусловлен тем, что светофильтр обеспечивает неполное подавление света вне рабочей полосы пропускания. Наглядно это можно представить как «лепестки» на графике спектра пропускания, что показано на рисунке 2.17. Интегрирование этих величин по спектру даёт множитель 1,1 к полосе пропускания. Отметим, что для расчёта сигнала от вспышки этот коэффициент не применяется, так как ширина триплета спектра молнии меньше $\Delta\lambda_{0,5}$, то есть в лепестковых частях спектра пропускания светофильтра нет излучения молнии.

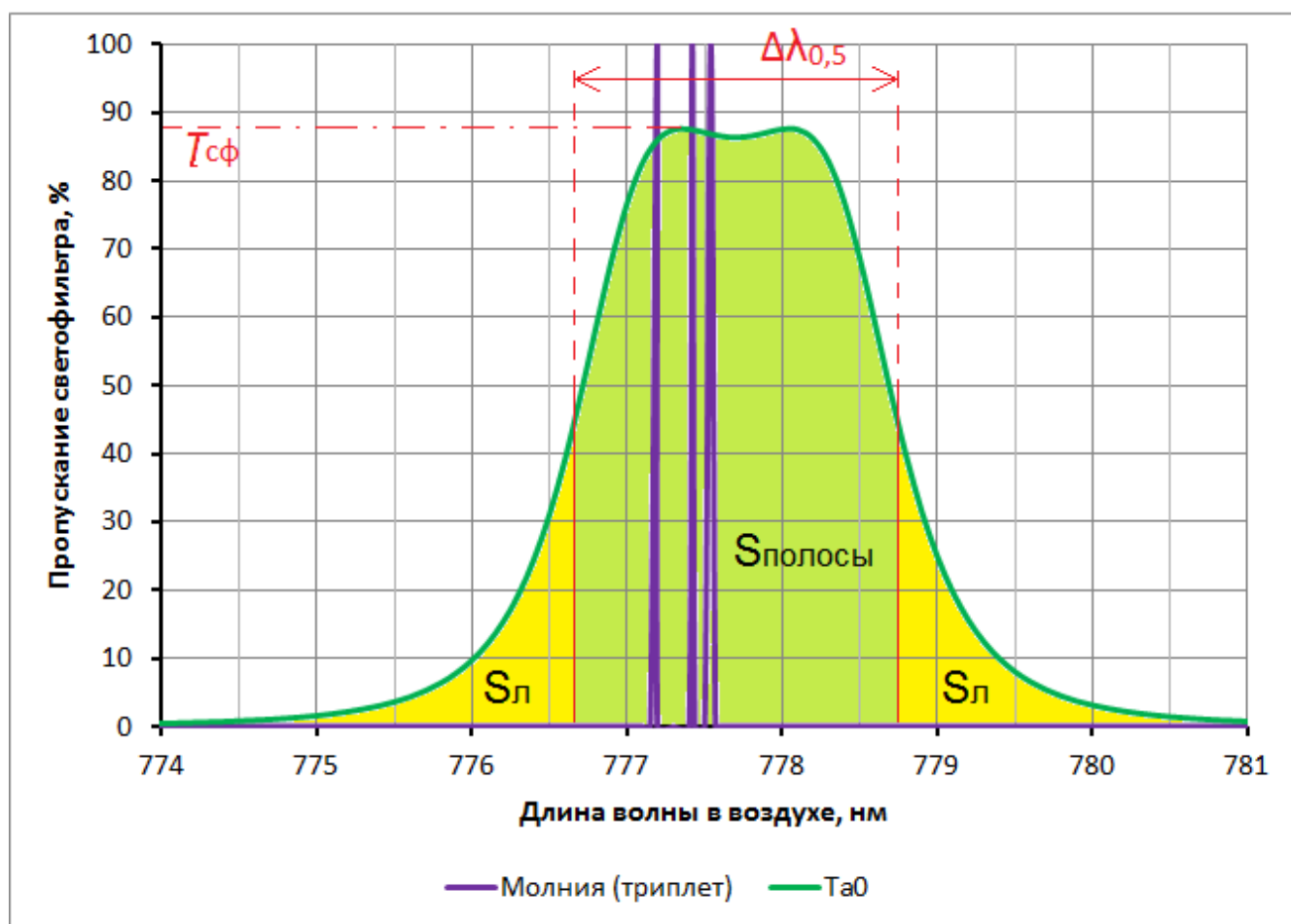


Рисунок 2.17. Влияние «лепестков» спектра светофильтра на эффективную ширину полосы пропускания. Имеем, что $2 \cdot S_{\text{л}} + S_{\text{полосы}} > \tau_{\text{сф}} \cdot \Delta\lambda_{0,5}$. Для превращения этого соотношения в равенство необходимо домножение правой части на 1,1: $2 \cdot S_{\text{л}} + S_{\text{полосы}} = \tau_{\text{сф}} \cdot 1,1 \cdot \Delta\lambda_{0,5}$. Таким образом, эффективная ширина полосы пропускания на 10% больше фактической.

Также в расчёте учтена временная фаза свечения отблеска: в наихудшем случае максимум яркости приходится на момент окончания экспонирования

снимка N и начала экспонирования снимка N+1 . То есть энергия, высвеченная вспышкой, поделится поровну между двумя снимками, как и сигнал. Очевидно, что временная фаза вспышки никак не влияет на фоновый сигнал, так как яркость облаков постоянна во времени на промежутках порядка 1 мс. Временная диаграмма импульса для двух вариантов фаз приведена на рисунке 2.18.

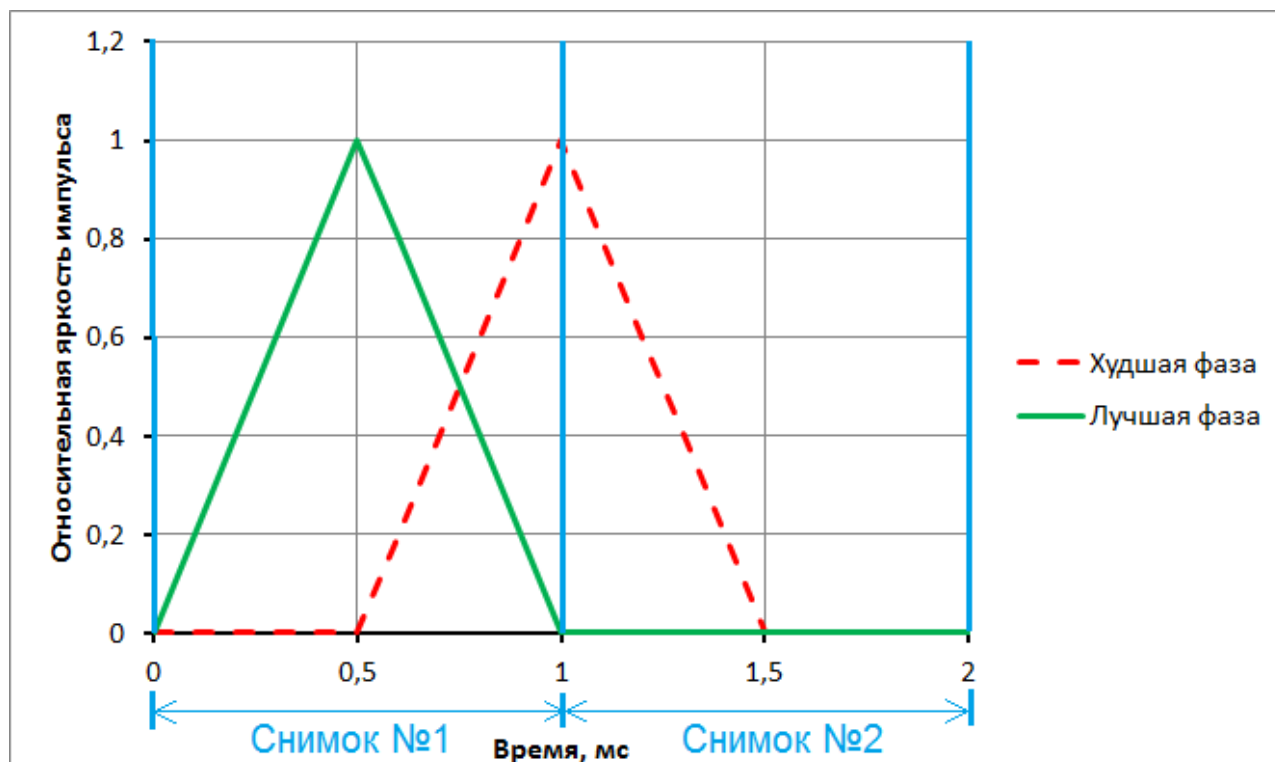


Рисунок 2.18. Лучшая и худшая временная фаза свечения отблеска. В худшем случае получается, что отблеск яркостью $10 \text{ мкДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$ воспринимается как $5 \text{ мкДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$, наблюдаемый в двух последовательных по времени снимках.

Построим на рисунке 2.19. для фотоприёмника №1 зависимости фонового сигнала от ширины полосы пропускания светофильтра для разных относительных отверстий объектива D/f . Условия наблюдения наихудшие: альbedo фона 0,8 и возвышение Солнца 90 градусов.

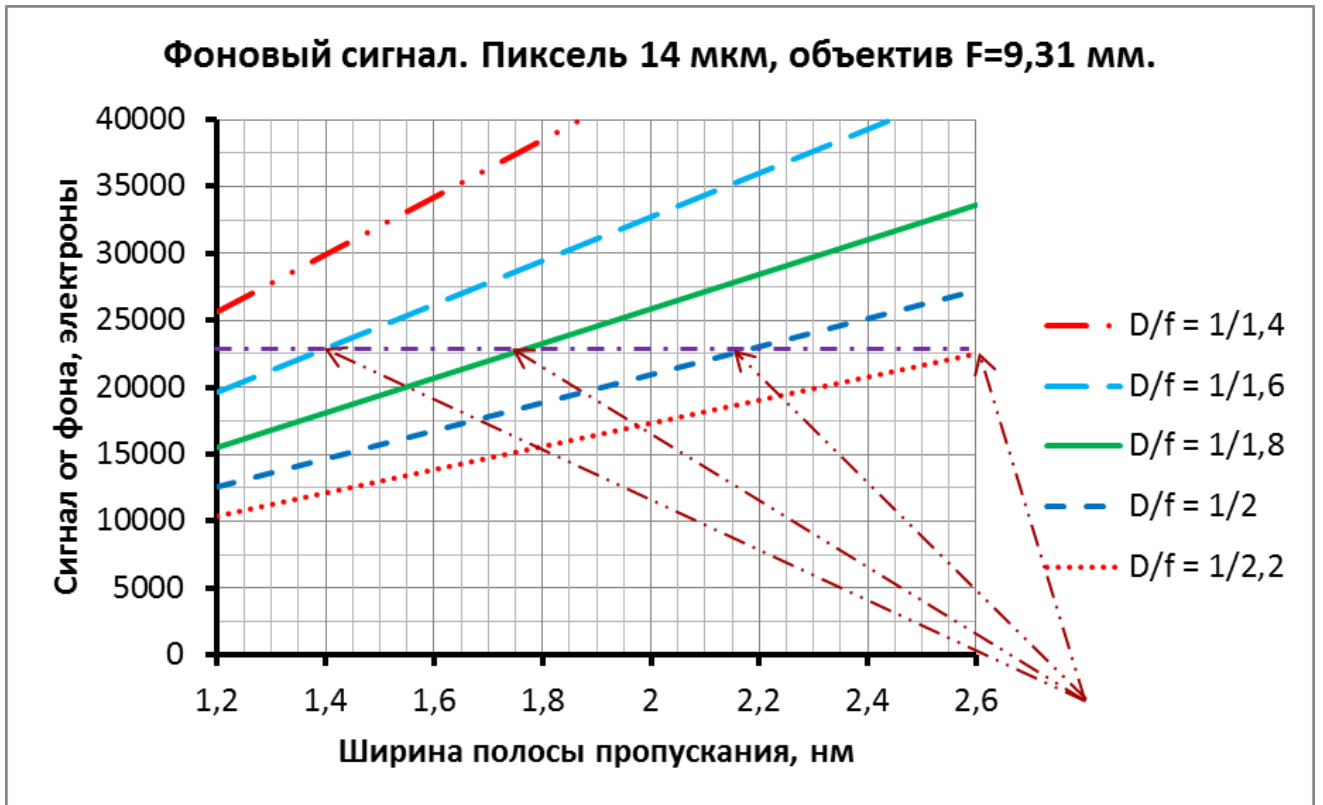


Рисунок 2.19. Зависимости фонового сигнала от ширины полосы пропускания светофильтра $\Delta\lambda_{0,5}$ для разных величин относительного отверстия объектива. Возвышение Солнца 90 градусов, альbedo облаков 0,8. Фотоприёмник №1 с пикселем 14 мкм. Стрелками помечены «рабочие точки»: сочетание характеристик, при которых выполняется условие оптимальности D/f .

Из рисунка 2.19 видно, что для недопущения «пересветки» фотоприёмника (пиксель 14 мкм) относительное отверстие объектива при светофильтре с $\Delta\lambda_{0,5}=1,75$ нм не должно превышать $1/1,8$. При использовании более широкополосного светофильтра ($\Delta\lambda_{0,5}=2,15$ нм) относительное отверстие D/f нужно уменьшить до $1/2$.

Проведём аналогичные построения (рисунок 2.20) для объектива с фокусным расстоянием 4,32 мм (использование совместно с фотоприёмником №2).

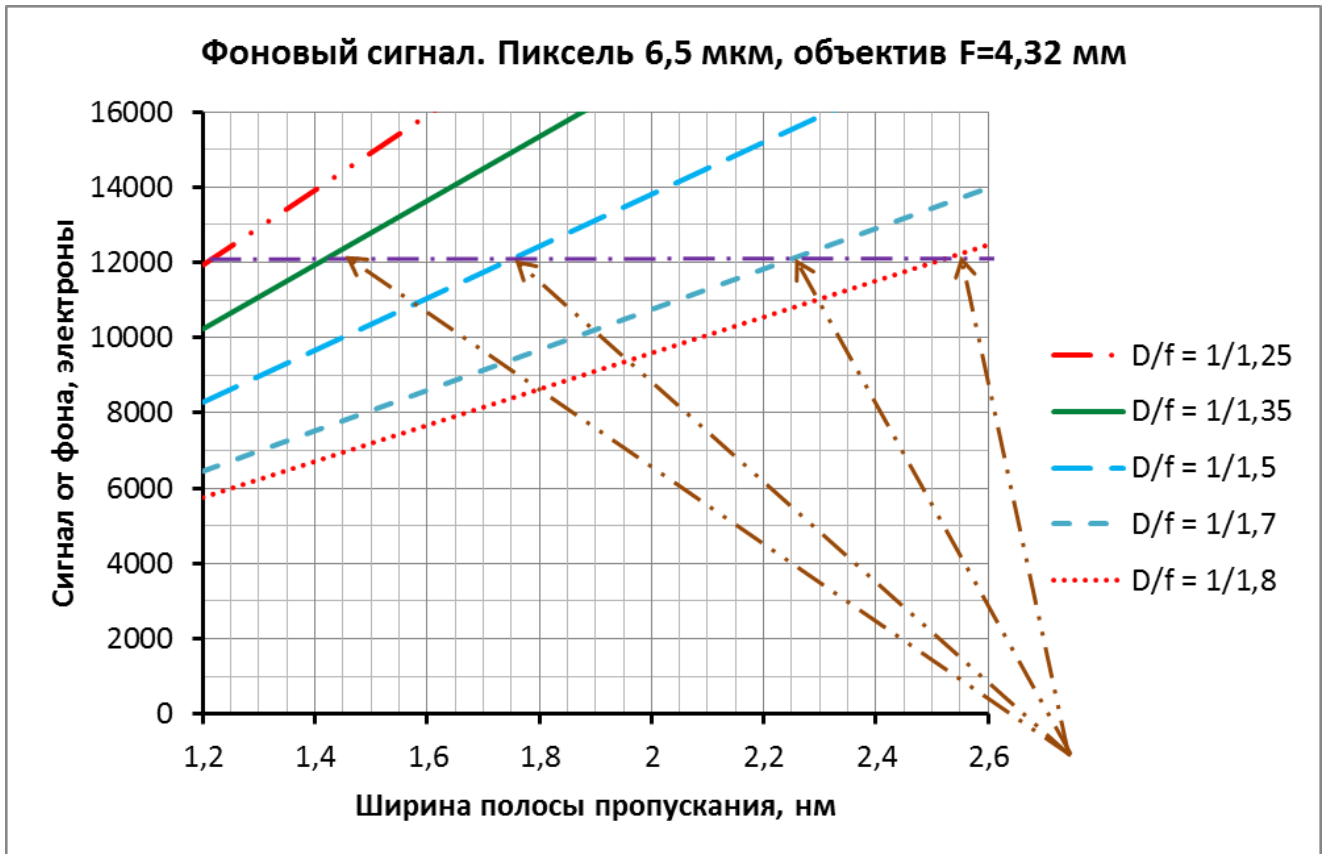


Рисунок 2.20. Зависимости фонового сигнала от ширины полосы пропускания светофильтра $\Delta\lambda_{0,5}$ для разных величин относительного отверстия объектива. Возвышение Солнца 90 градусов, альbedo облаков 0,8. Фотоприёмник №2 (пиксель 6,5 мкм). Стрелками помечены «рабочие точки»: сочетание характеристик, при которых выполняется условие оптимальности D/f .

Из рисунка 2.20 видно, что для недопущения «пересветки» фотоприёмника (пиксель 6,5 мкм) относительное отверстие объектива при светофильтре с $\Delta\lambda_{0,5}=1,45$ нм не должно превышать $1/1,35$. При использовании более широкополосного светофильтра ($\Delta\lambda_{0,5}=2,25$ нм) относительное отверстие D/f нужно уменьшить до $1/1,7$.

2.6.2. Определение необходимого соотношения сигнал/шум

2.6.2.1. Взаимосвязь ОСШ и вероятности обнаружения отблеска

В п. 2.6.1. для обоих вариантов построения оптико-электронного блока (объективов $F=9,31$ мм и $F=4,32$ мм совместно с фотоприёмниками «1 и №2 соответственно) были установлены «рабочие точки»: сочетания характеристик, при которых выполняются условия оптимальности относительного отверстия D/f . Теперь необходимо окончательно определить относительное отверстие D/f .

Ключевой характеристикой ПАК ДМ является вероятность обнаружения вспышки молнии характерной яркости. В свою очередь, вероятность обнаружения отблеска зависит от соотношения сигнал/шум. Проведём расчёт этой величины для определения D/f . С учётом полученных ранее соотношений для сигналов от вспышки и фона и при допущении $U_{\text{вспышки}} \ll U_{\text{фона}}$ (на дневной стороне витка) имеем (2.16), что:

$$SNR \left(\left(\frac{D}{f} \right), \Delta\lambda_{0,5}, h_s, \rho, k_{\text{фаз}} \right) \sim \frac{U_{\text{вспышки}}}{\sqrt{U_{\text{фона}} + N_{\text{счит}}^2}} \quad (2.16)$$

Где:

$N_{\text{счит}}$ – шум считывания фотоприёмника,

$k_{\text{фаз}}$ – коэффициент временной фазы. Изменяется от 0,5 (худшая фаза) до 1 (лучшая фаза)

Для последующего формирования облика ПАК ДМ необходимо выявить связь вероятности обнаружения отблеска и получаемого соотношения сигнал/шум. Проведём оценку вероятности обнаружения молнии. Введём здесь два критерия обнаружения: преодоление порога пикселем-кандидатом и наличием не менее двух смежных таких пикселей в изображении отблеска. Подробно данные критерии будут описаны и обоснованы в Главе 3.

При яркости отблеска $V_{\text{мол}}$, крутизне преобразования АЦП А [электрон/ур. АЦП], соотношении сигнал/шум $SNR(V_{\text{мол}}, h_s, k_{\text{фазы}})$, СКО шума $\sigma(h_s)$ и пороге обнаружения рогog [уровней АЦП] вероятность преодоления фильтрации по порогу одиночным пикселем отблеска можно оценить как:

$$P_{\text{од}}(B_{\text{мол}}, h_s) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{A \cdot (\text{porog} + \frac{1}{2})}^{\infty} e^{-\frac{(x - \text{SNR} \cdot \sigma)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx \quad (2.17)$$

Здесь интегрирование ведётся от величины $A \cdot (\text{porog} + \frac{1}{2})$, а не от $A \cdot \text{porog}$, так как необходимо учесть округление сигнала при его оцифровке (переводе из электронов в уровни АЦП). Подынтегральная функция представляет собой плотность распределения Гаусса с матожиданием, равным сигналу от отблеска (в электронах) $U_{\text{мол}} = \text{SNR}(B_{\text{мол}}, h_s, k_{\text{фазы}}) \cdot \sigma(h_s)$.

Тогда обнаружением истинного отблеска является событие, при котором порог будет преодолен хотя бы двумя смежными пикселями. Значит, из 8 соседей пикселя порог должен преодолеть хотя бы один. Следовательно, совместная вероятность определится по (2.18) как:

$$P_{\text{истин}}(\text{porog}, B_{\text{мол}}, h_s) = P_{\text{од}}(\text{porog}, B_{\text{мол}}, h_s) \cdot \left(1 - \left(1 - P_{\text{од}}(\text{porog}, B_{\text{мол}}, h_s)\right)^8\right) \quad (2.18)$$

Здесь учтено, что событие «преодоление порога хотя бы одним из соседей» является дополнительным к событию «никто из 8 соседей не преодолел порог», их суммарная вероятность равна 1.

Осталось определить вероятность обнаружения ложного отблеска. Она зависит только от СКО шума и величины порога в алгоритме обработки. Вероятность преодоления порога одиночным пикселем, не содержащим отблеск, определяется распределением Гаусса с СКО $\sigma(h_s)$ и матожиданием 0 :

$$P_{\text{фон}}(\text{porog}, h_s) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{A \cdot (\text{porog} - \frac{1}{2})}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx \quad (2.19)$$

Тогда вероятность обнаружения ложного отблеска в данном пикселе, по аналогии с расчётом для истинного отблеска, составит:

$$P_{\text{ложный}}(\text{porog}, h_s) = P_{\text{фон}}(\text{porog}, h_s) \cdot \left(1 - \left(1 - P_{\text{фон}}(\text{porog}, h_s)\right)^8\right) \quad (2.20)$$

На рисунке 2.21 показан графический смысл расчётов.

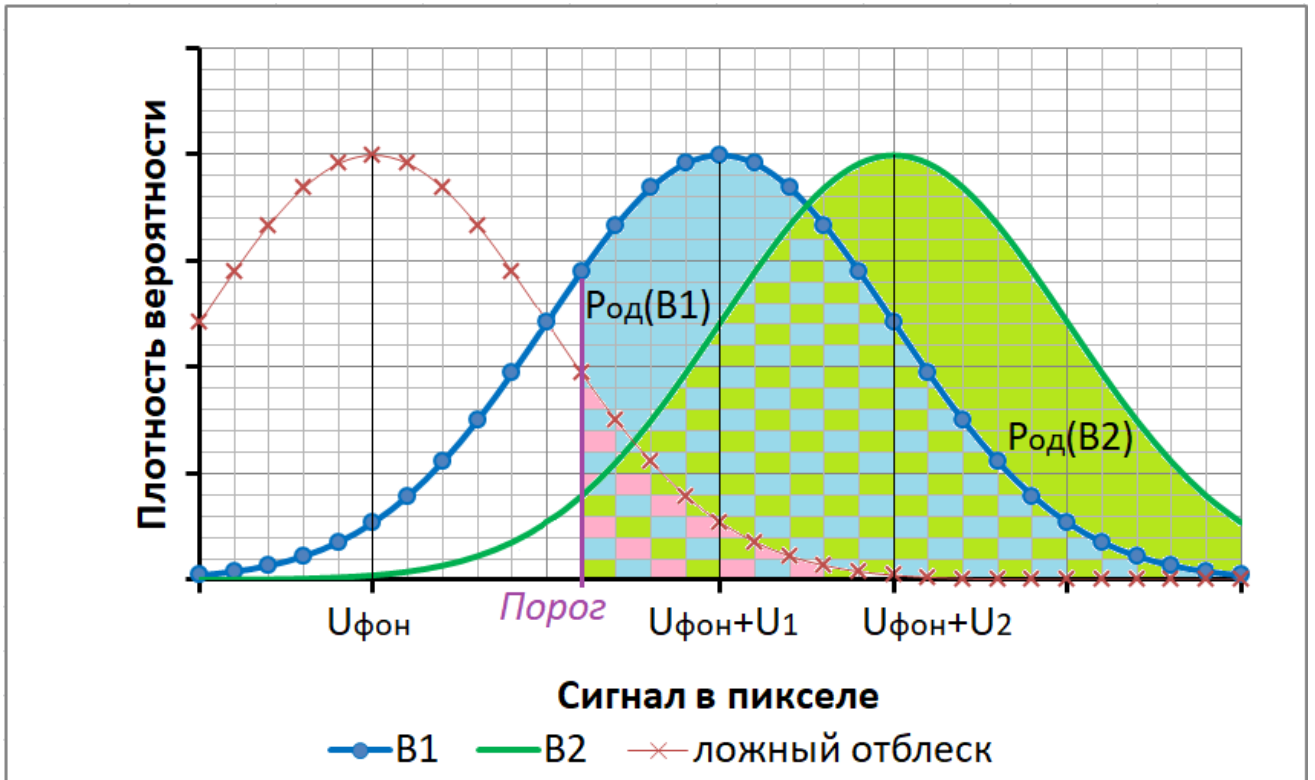


Рисунок 2.21. Графический смысл вероятностей преодоления порога истинным и ложным пикселями. В данном примере показаны плотности вероятности сигналов от двух истинных отблесков и сигнала от ложного отблеска. Соответствующие вероятности преодоления порога представляют собой площади, ограниченные кривыми. Яркость отблеска 2 больше яркости отблеска 1.

Выберем пороги фильтрации для фотоприёмников с двумя значениями зарядовой вместимости пикселя 16 и 30 тысяч электронов (соответствуют фотоприёмникам №2 и №1). Сигнал фона составляет 70% от зарядовой вместимости. В приведённых оценках бинирование составляет 8*8 пикселей. Результаты расчёта показаны на рисунке 2.22.

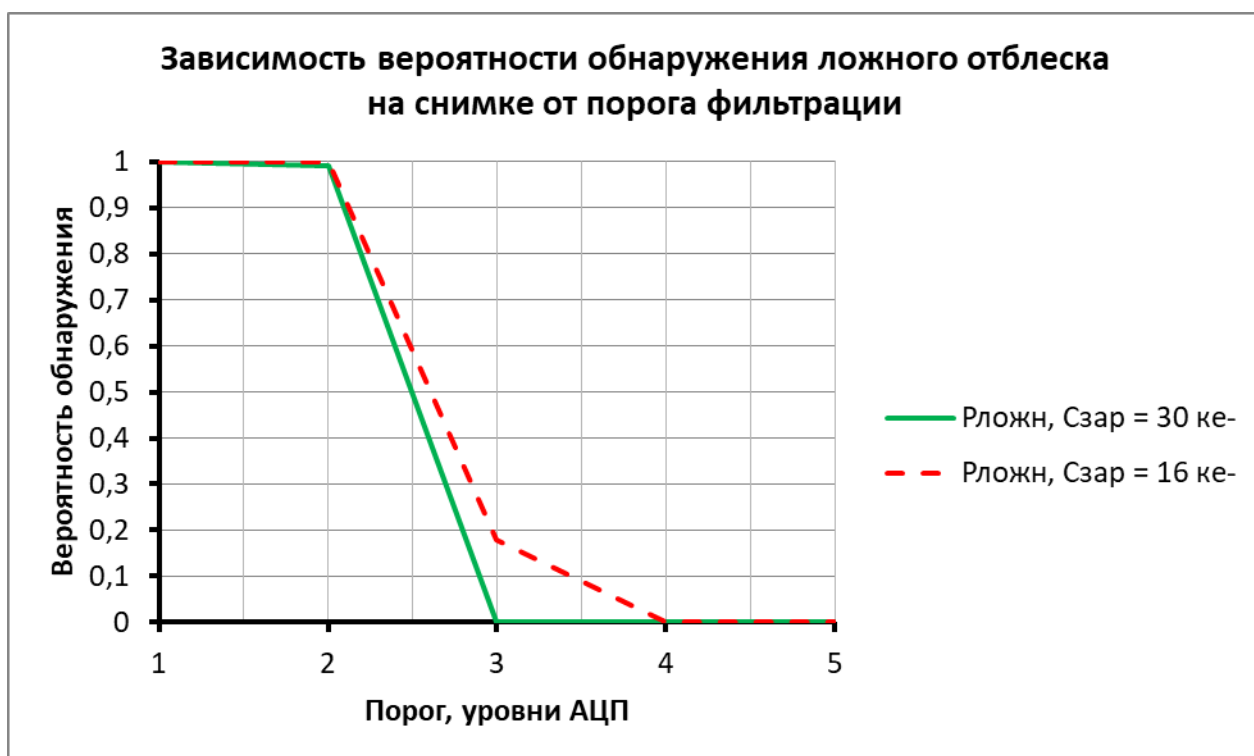


Рисунок 2.22. Зависимости вероятности обнаружения ложной молнии на снимке от порога фильтрации. Размер снимка 100*100 пикселей (после бинирования 8*8).

Из рисунка 2.22 видно, что вероятность обнаружения ложного отблеска на снимке не превышает 10^{-2} при пороге фильтрации 3 уровня АЦП для фотоприёмника №1 и 4 уровня АЦП для фотоприёмника №2.

Построим на рисунке 2.23 зависимости вероятности обнаружения отблеска от SNR для фотоприёмников с двумя значениями зарядовой вместимости пикселя 16 и 30 тысяч электронов (соответствуют фотоприёмникам №2 и №1). Сигнал фона составляет 70% от зарядовой вместимости. В приведённых оценках бинирование составляет 8*8 пикселей. Порог фильтрации для каждого из фотоприёмников задан в соответствии с предыдущим абзацем.

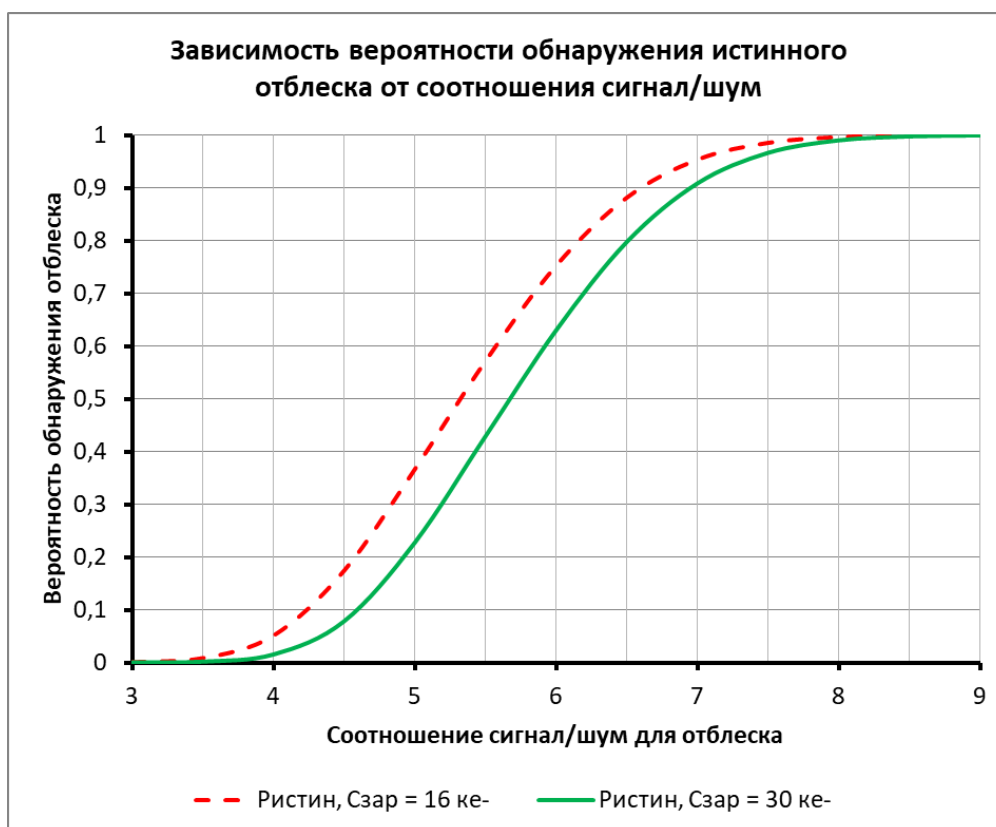


Рисунок 2.23

Из рисунка 2.23 видно, что для зачётного отблеска вероятность обнаружения 0,7 реализуется при $SNR \sim 6$. Однако нужно помнить, что в реальности имеет место проблема временной фазы: энергия, высвеченная отблеском, может распределиться между двумя снимками, последовательными по времени. Следовательно, SNR может принимать значения от 3 до 6. Таким образом, с учётом случайности временной фазы можно сказать, что SNR зачётного отблеска должно быть не менее 8 в лучшей фазе и 4 в худшей. Описанный критерий позволяет обеспечить вероятность обнаружения отблеска не менее 60-70% даже в наихудших условиях съёмки.

2.6.2.2. Фотоприёмник №1

Построим на рисунках 2.24-2.25 зависимости ОСШ от ширины полосы пропускания для разных относительных отверстий объективов. Условия съёмки наихудшие: альbedo облачного фона 0,8 и возвышение Солнца 90 градусов. Обрыв графиков соответствует достижению сигналом величины зарядовой ёмкости фотоприёмника с возрастанием ширины полосы пропускания светофильтра $\Delta\lambda_{0,5}$.

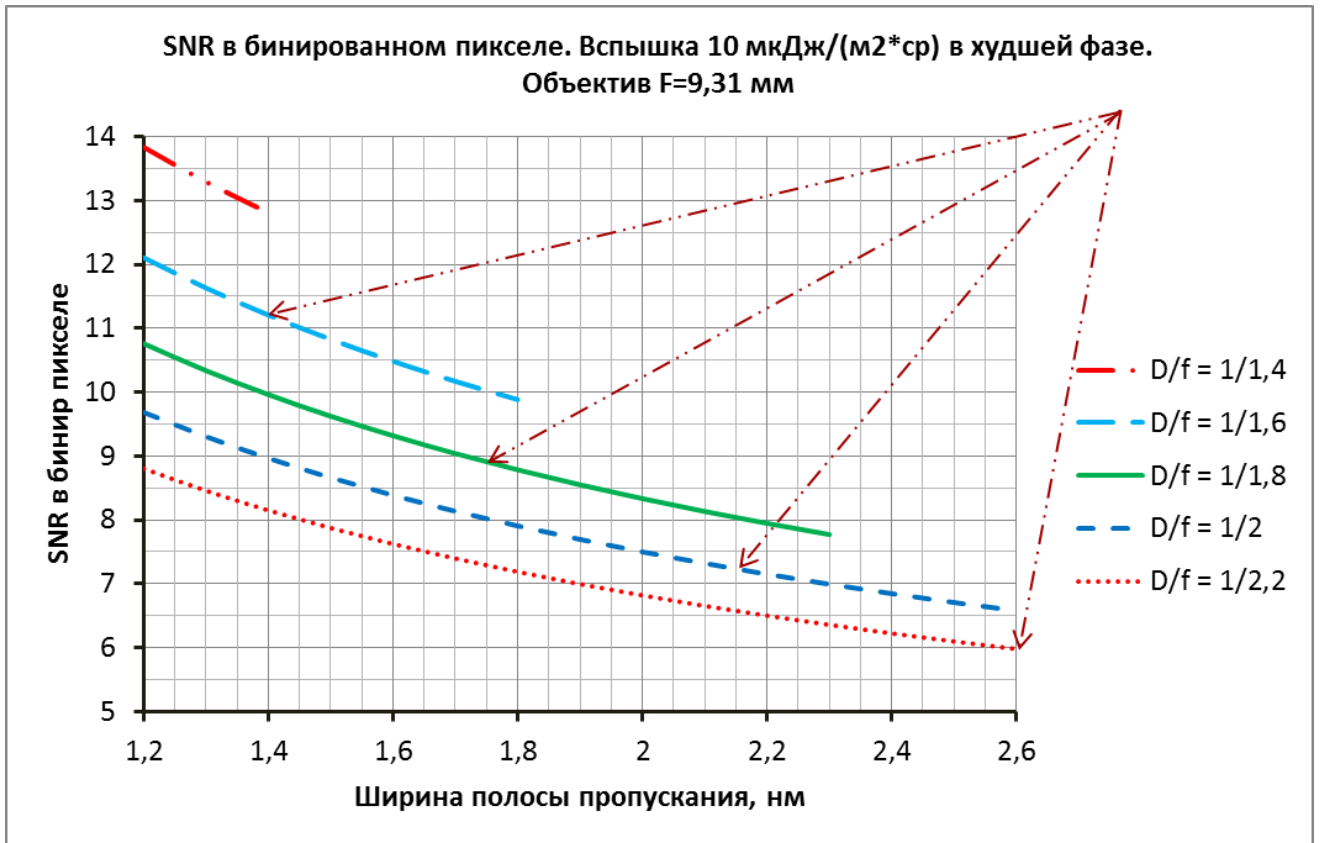


Рисунок 2.24.

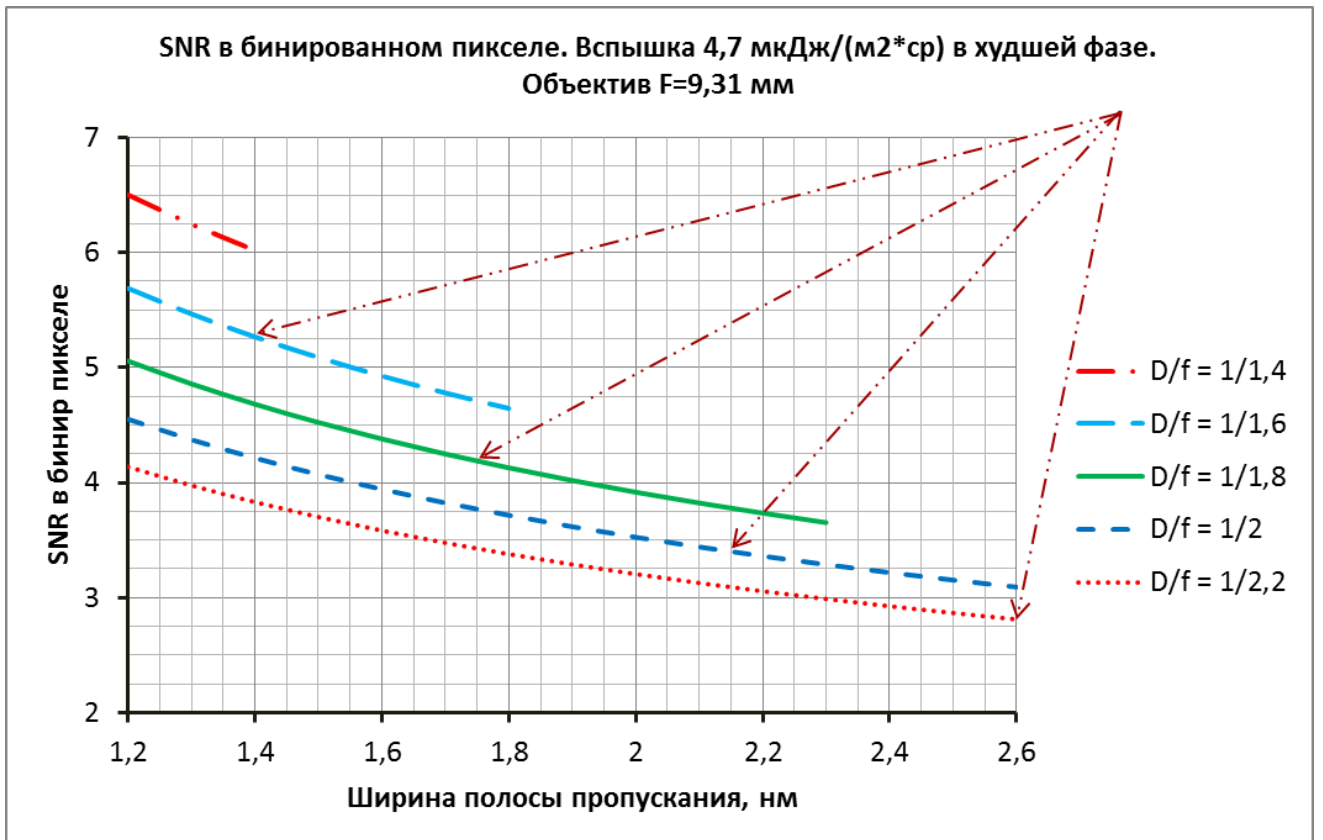


Рисунок 2.25.

Из рисунков 2.24 – 2.25 видно, что наилучшее ОСШ среди всех «рабочих точек» для одних и тех же условий съёмки достигается при $D/f=1/1,4$ и $\Delta\lambda_{0,5}=1,4$ нм. Но в п. 2.5.2 показано, что такое сочетание характеристик требует изготовления светофильтра с диаметром 53 мм. Светофильтр такого размера труднореализуем, следовательно, данная «рабочая точка» (сочетание характеристик системы) неприемлема.

При $D/f=1/1,8$ и $\Delta\lambda_{0,5}=1,75$ нм диаметр светофильтра должен быть 36 мм (см. п. 2.5.2.), что вполне реализуемо на сегодняшней технологической базе. Так как именно эта «рабочая точка» обладает наибольшим ОСШ среди всех трёх оставшихся, то именно она и будет принята нами как окончательное сочетание характеристик ПАК ДМ при использовании фотоприёмника №1. Для отблеска с яркостью $4,7$ мкДж/(м²*ср) ОСШ в одиночном бинированном пикселе 8*8 составит не менее 4,1. Выше было показано, что даже для наихудших условий съёмки этого достаточно для обеспечения вероятности обнаружения 70%.

2.6.2.3. Фотоприёмник №2

Построим на рисунках 2.26-2.27 зависимости ОСШ от ширины полосы пропускания для разных относительных отверстий объективов и для второго фотоприёмника.

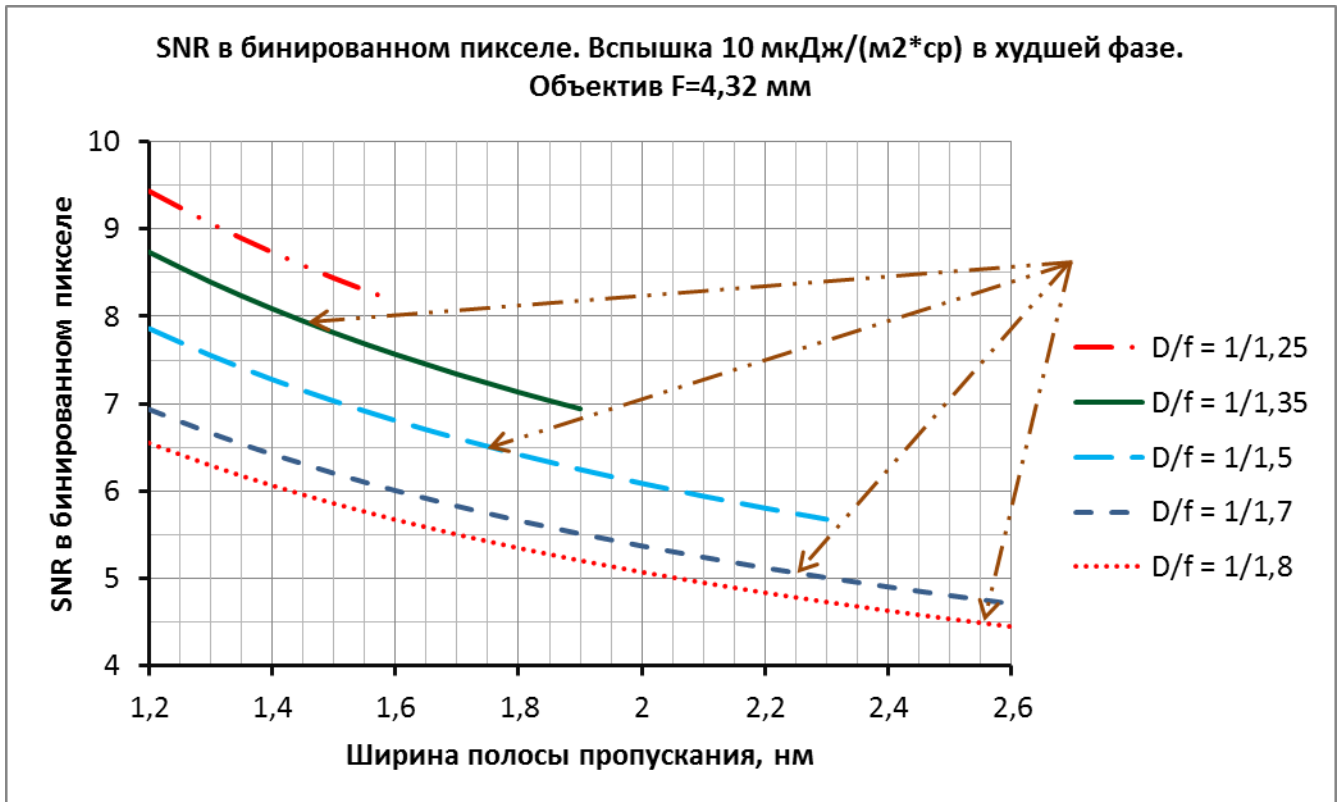


Рисунок 2.26.

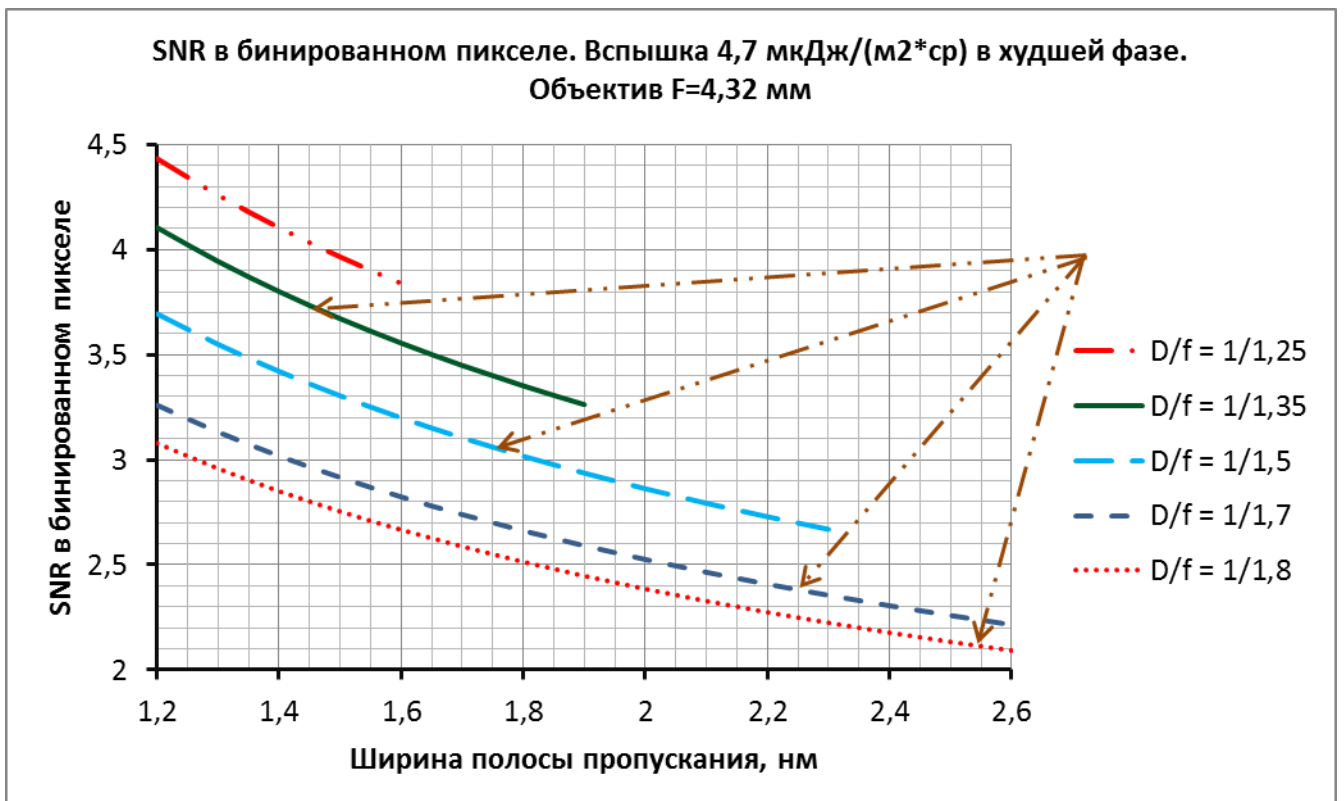


Рисунок 2.27.

Из рисунков 2.26 – 2.27 видно, что наилучшее ОСШ среди всех «рабочих точек» для одних и тех же условий съёмки достигается при $D/f=1/1,35$ и $\Delta\lambda_{0,5}=1,45$ нм. В п. 2.5.2 показано, что такая ширина полосы пропускания труднореализуема, но остальные рабочие точки обладают неприемлемо низким ОСШ: для отблеска с яркостью $4,7$ мкДж/(м²*ср) оно едва превышает 3 даже при $\Delta\lambda_{0,5}=1,75$ нм. Так как фотоприёмник №2 не является основным вариантом, то для схемы с ним приемлемое сочетание характеристик $D/f=1/1,35$, $\Delta\lambda_{0,5}=1,45$ нм, диаметр светофильтра 28 мм. В таком случае вероятность обнаружения отблеска с яркостью $4,7$ мкДж/(м²*ср) ожидается на уровне 55-60%.

Отметим, что проведённые расчёты параметров оптической схемы выполнялись для области обзора $60*60$ градусов, соответствующей размеру кадра $520*520$ км, проекции пикселя $5,4$ км при кадровой частоте 1000 Гц. Столь высокая кадровая частота необходима в наихудших условиях съёмки. Для достижения гибкости характеристик ПАК ДМ целесообразно реализовать объектив с «запасом» поля зрения: $67*67$ градусов. При малых освещённостях облаков это позволит уменьшить кадровую частоту КМОП-фотоприёмника, что, в свою очередь, даст возможность увеличить размер кадра и область обзора до $600*600$ км. Уменьшение коэффициента пропускания светофильтра для периферийных областей кадра в этом случае будет парировано малой яркостью фона.

2.6.3. Сводная таблица характеристик

Сведём в таблицу 2.2 характеристики, полученные при определении аппаратных решений ПАК ДМ:

Таблица 2.2.

Параметр	Значение	
	№1	№2
Формат изображения при кадровой частоте 1000 Гц, исходных пикселей	768*768	
Размер снимка при высоте орбиты 450 км и кадровой частоте 1000 Гц, км	520*520	
Угловой размер снимка при кадровой частоте 1000 Гц, градусы	60*60	
Максимальный формат изображения, исходных пикселей	880*880	
Максимальный размер снимка при высоте орбиты 450 км, км	600*600	
Поле зрения объектива, градусы	67*67	
Проекция исходного пикселя, м	677	
Бинирование в основном режиме, пикселей	8*8	
Проекция пикселя в основном режиме, км	5,4	
Проекция пикселя при бинировании 6*6, км	4,05	
Проекция пикселя при бинировании 4*4, км	2,7	
Фокусное расстояние объектива, мм	9,31	4,32
Относительное отверстие объектива	1/1,8	1/1,35
Ширина полосы пропускания светофильтра, нм	1,75	1,45
Центральная длина волны светофильтра при нормальном падении луча (из воздуха), нм	777,85	777,7
Диаметр светофильтра, мм	36	28
ОСШ для вспышки яркостью 4,7 мкДж/(м ² *ср), не менее	4,2	3

2.6.4 Выводы

Рассмотрены два варианта построения ОЭБ. Установлено, что построение ОЭБ целесообразно выполнять на КМОП-фотоприёмнике с зарядовой емкостью не менее 25 тысяч электронов в одиночном пикселе и ориентироваться на бинирование 8*8 пикселей при наблюдении молний в наихудших условиях съёмки. Требуемая полоса пропускания светофильтра составляет 1,8 нм. Использование КМОП-фотоприёмника с малой зарядовой емкостью (16 тысяч электронов) возможно, но в этом случае потребуются сужение полосы пропускания светофильтра до 1,4...1,5 нм, что порождает значительные технологические трудности.

2.7. Влияние оптического тракта

2.7.1. Функция передачи модуляции

В решаемой задаче функция передачи модуляции не столь важна, как в системах ДЗЗ высокого разрешения, так как размер изображения пятна-отблеска значительно больше пикселя. Тем не менее, данный вопрос необходимо рассмотреть, так как в случае сильного размытия изображения можно ожидать уменьшения вероятности распознавания вспышки.

ФПМ оптико-электронной системы на пространственной частоте ν состоит из двух множителей: ФПМ оптики с учётом дефокусировки x и ФПМ фотоприёмника: $MTF_{\text{сист}}(\nu) = MTF_{\text{опт}}(\nu) \cdot MTF_{\text{фпу}}(\nu)$

Также в искажении изображения участвует ФПМ атмосферной турбулентности, но для системы с пространственным разрешением 0,7...5,4 км ей можно пренебречь.

Для анализа ФПМ были взяты данные модельного объектива, имеющего характеристики, описанные в таблице 2.1. Оценим его ФПМ.

При отсутствии дефокусировки граничная частота идеального объектива для длины волны света λ составляет $\nu_0 = \frac{D}{f} \cdot \frac{1}{\lambda}$ [42]. Для учёта неидеальности объектива примем, что граничная частота $\nu_0 = 0,7 \cdot \frac{D}{f} \cdot \frac{1}{\lambda}$. Тогда при отсутствии дефокусировки ФПМ объектива можно оценить как:

$$MTF_{\text{опт}}(\nu) = \left[1 - \frac{\nu}{\nu_0} \right] \quad (2.21)$$

Однако оптико-электронные системы с большим относительным отверстием обладают высокой чувствительностью к дефокусировке: смещению плоскости изображения от идеального. Дефокусировка может появиться вследствие дефектов сборки камеры или при отклонении температуры объектива от номинальной. Следовательно, необходим учёт этого явления в расчётах и моделировании ПАК ДМ.

Геометрическое построение на рисунке 2.28 показывает, какой кружок рассеяния образуется в фокальной плоскости вследствие ошибок фокусировки [43]. Ошибки Δi_1 (влево) и Δi_2 (вправо) вызывают образование одного и того же кружка рассеяния диаметром d . Из подобия треугольников следует, что:

$$\frac{d/2}{\Delta i_1} = \frac{D/2}{f - \Delta i_1}$$

$$\frac{d/2}{\Delta i_2} = \frac{D/2}{f + \Delta i_2}$$

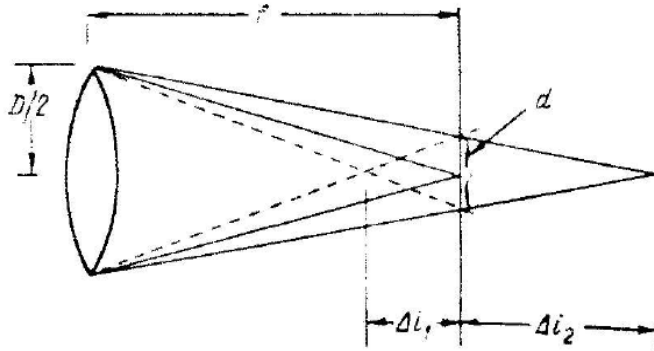


Рисунок 2.28. Кружок рассеяния, вызванный расфокусировкой

Заметим, что относительная расфокусировка в обе стороны по отношению к фокусу даёт приблизительно одинаковый кружок рассеяния диаметром $d = D \cdot \frac{\Delta i_1}{f}$. Соответствующий дефокусировке $\Delta i_1 = x$ угловой диаметр кружка φ можно определить, разделив d на f :

$$\varphi = \frac{D \cdot x^2}{f^2} \quad (2.22)$$

В работе [44] показано выражение для ФПМ в зависимости от ошибки фокусировки x , относительного отверстия оптической системы и длины волны для случая ограниченной дифракцией круглой апертуры, освещенной монохроматической плоской волной. В статье [45] показано упрощение данного уравнения, где ФПМ дефокусировки определена при помощи параметра Δ :

$$\Delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{\lambda} \cdot \sin^2 \left(\frac{D}{f} \right) \quad (2.23)$$

Это позволило вычислить ФПМ(ν_r, Δ) в диапазоне изменения параметра Δ от 0 до 50. Результаты расчётов представлены на рисунке 2.29 графически:

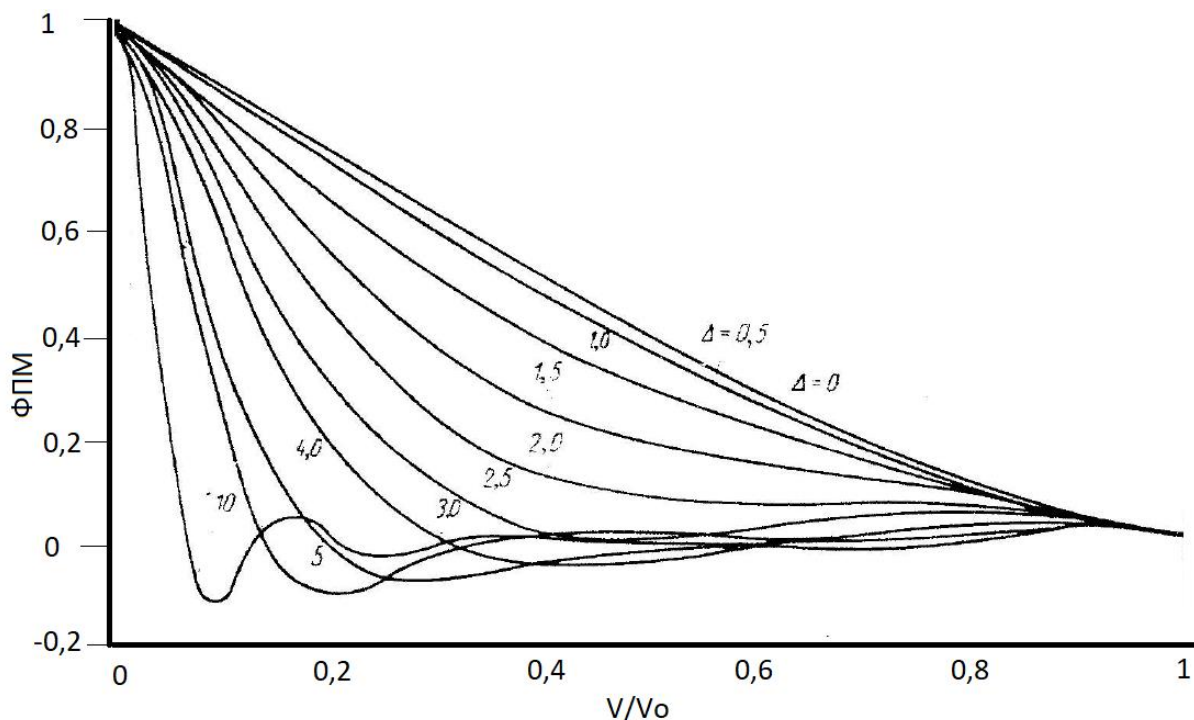


Рисунок 2.29. ФПМ расфокусированной оптики, ограниченной дифракцией для разных значений параметра Δ (по материалам [43]). Здесь V_0 – граничная частота объектива при отсутствии дефокусировки.

Таким образом, можно установить связь ФПМ объектива, смещения фокальной плоскости x , относительного отверстия объектива D/f и длины волны λ :

$$\Delta(x) = \frac{1}{2} \cdot \frac{x}{\lambda} \cdot \sin^2 \left(\frac{D}{f} \right) \quad (2.24)$$

Показанный на рисунке 2.31 график позволяет установить соответствие между граничной частотой и величиной параметра Δ . Построим на рисунке 2.30 зависимость граничной частоты $\nu_{гр}$ от параметра Δ для света с $\lambda=777$ нм:

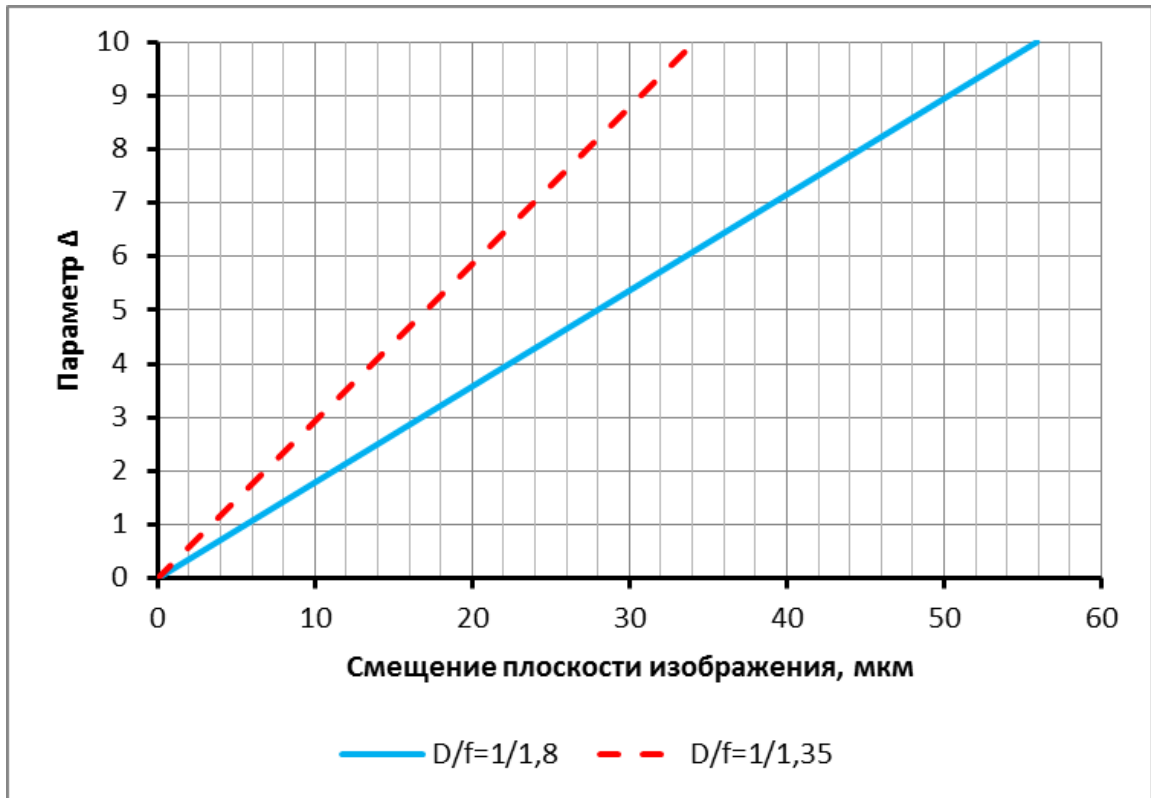


Рисунок 2.30.

Полученный график можно перестроить на рисунке 2.31 в зависимость нормированной граничной частоты от смещения плоскости изображения для $\lambda=777$ нм. Граничная частота нормирована на ν_0 – граничную частоту при нулевой дефокусировке.

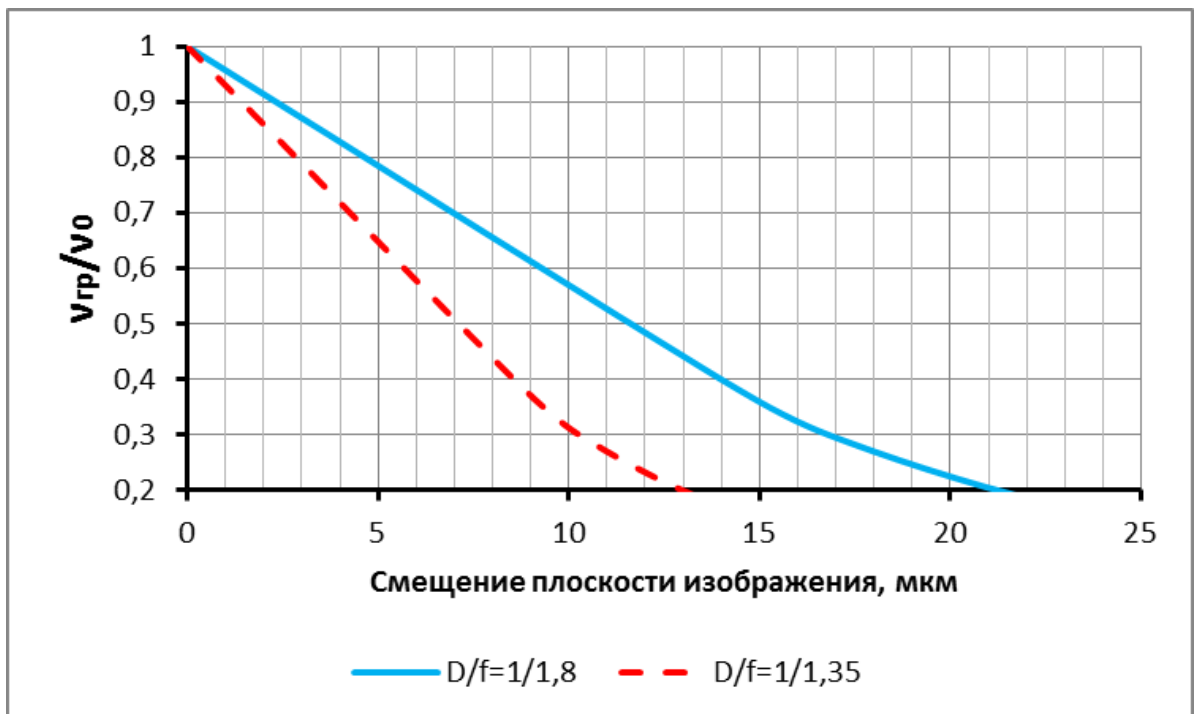


Рисунок 2.31.

Из рисунка 2.31. видно, что для объектива с $D/f = 1/1,8$ граничная частота падает в 2 раза при дефокусировке 12 мкм, тогда как для более светосильного объектива $D/f=1/1,35$ это происходит уже при смещении фотоприёмника на 7 мкм.

Таким образом, ФПМ объектива с учётом дефокусировки x можно оценить как:

$$MTF_{\text{опт}}(\nu, x) = 1 - \frac{\nu}{\nu_{\text{гр}}\left(x, \frac{D}{f}, \lambda\right)} \quad (2.25)$$

Также необходимо учитывать ФПМ фотоприёмника. Как показано в п. 2.4., общую ФПМ фотоприёмника можно оценить по формуле (2.26). При этом примем следующие граничные условия: $MTF_{\text{диффузии}}(0) = 1$ и $MTF_{\text{диффузии}}(\nu_N) = 0,9$:

$$MTF_{\text{фпу}}(\nu) = MTF_{\text{геом}}(\nu) \cdot MTF_{\text{диффузии}}(\nu) = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}} \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{\nu}{\nu_N}\right) \quad (2.26)$$

В результате общая ФПМ системы описывается формулой (2.27):

$$\begin{aligned} MTF_{\text{сист}}(\nu) &= MTF_{\text{опт}}(\nu) \cdot MTF_{\text{фпу}}(\nu) = MTF_{\text{опт}}(\nu) \cdot MTF_{\text{геом}}(\nu) \\ &\cdot MTF_{\text{диф}}(\nu) = \\ &= \left(1 - \frac{\nu}{\nu_{\text{гр}}\left(x, \frac{D}{f}, \lambda\right)}\right) \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}\right)}{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\nu}{\nu_N}} \cdot \left(1 - 0,1 \cdot \frac{\nu}{\nu_N}\right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Общий вид ФПМ системы при разных D/f показан на рисунке 2.32.

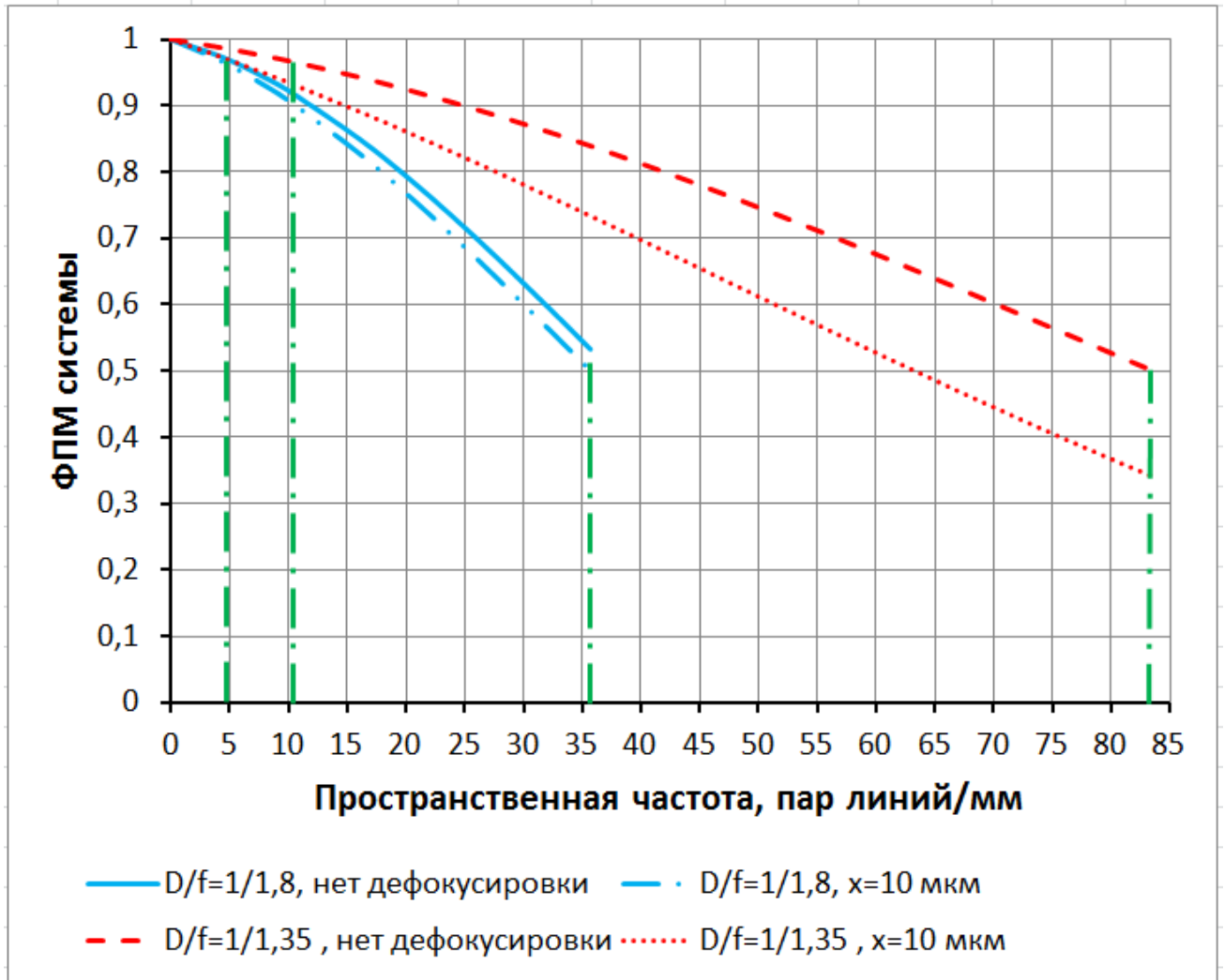


Рисунок 2.32. Вертикальными линиями показаны частоты Найквиста и $1/8$ частоты Найквиста для фотоприёмников с пикселем размером 14 мкм и 6,5 мкм. Длина волны света 777 нм. Величина $1/8$ частоты Найквиста соответствует бинированию $8*8$ пикселей.

Из рисунка 2.32. видно, что при работе в основном режиме, когда снимки поступают на обработку в бинированном виде $8*8$ пикселей, дефокусировка не оказывает заметного влияния на их качество, так как ФПМ системы на пространственных частотах 5...10 пар линий/мм составляет не менее 0,9. В то же время для построения системы на основе светосильного объектива $D/f=1,35$ и матрицы с маленьким пикселем (6,5 мкм) размытие вследствие даже небольшой дефокусировки будет заметным при работе в режиме координатной привязки, когда бинирование не производится. Полученные результаты ещё раз подтверждают вывод о предпочтительности КМОП-фотоприёмника с достаточно крупными (не менее 12 мкм) пикселями для построения ПАК ДМ.

2.7.2. Виньетирование

Ещё одной задачей является оценка влияния виньетирования в объективе на работу ПАК ДМ. Пусть освещённость на краю поля зрения составляет $1 - k_{\text{вин}}$ от освещённости в центре поля зрения (где $0 < k_{\text{вин}} \leq 1$). Соответственно, в идеальном случае (виньетирования нет) имеем, что $k_{\text{вин}} = 0$. Тогда связь SNR в центре и на краю поля при одинаковой фоноцелевой обстановке на дневной стороне витка можно описать как:

$$\begin{aligned} SNR_{\text{край}} &= \frac{U_{\text{вспышки край}}}{\sqrt{U_{\text{фона край}} + N_{\text{счит}}^2}} = \\ &= \frac{(1 - k_{\text{вин}}) \cdot U_{\text{вспышки центр}}}{\sqrt{(1 - k_{\text{вин}}) \cdot U_{\text{фона центр}} + N_{\text{счит}}^2}} \sim \sqrt{1 - k_{\text{вин}}} \cdot SNR_{\text{центр}} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Как правило, даже для широкопольных объективов с расширителем пучка коэффициент виньетирования не превышает 0,2. Тогда получим, что:

$$SNR_{\text{край}} \sim \sqrt{1 - k_{\text{вин}}} \cdot SNR_{\text{центр}} = 0,89 \cdot SNR_{\text{центр}} \quad (2.29)$$

С учётом незначительной площади периферии кадра получаем, что виньетирование не оказывает существенного влияния на общую вероятность обнаружения отблеска.

2.8. Конструктивно-технологические решения

2.8.1. Оценка массогабаритных характеристик объектива

В предыдущих разделах расчётным путём были получены основные характеристики блока ОЭБ и его составных частей. Однако необходимо провести исследование получаемых массогабаритных характеристик ОЭБ и провести анализ возможного конструктивного облика. Для анализа оптической схемы был взят оптический выпуск объектива ООО «Макрооптика», приведённый на рисунке 2.33.

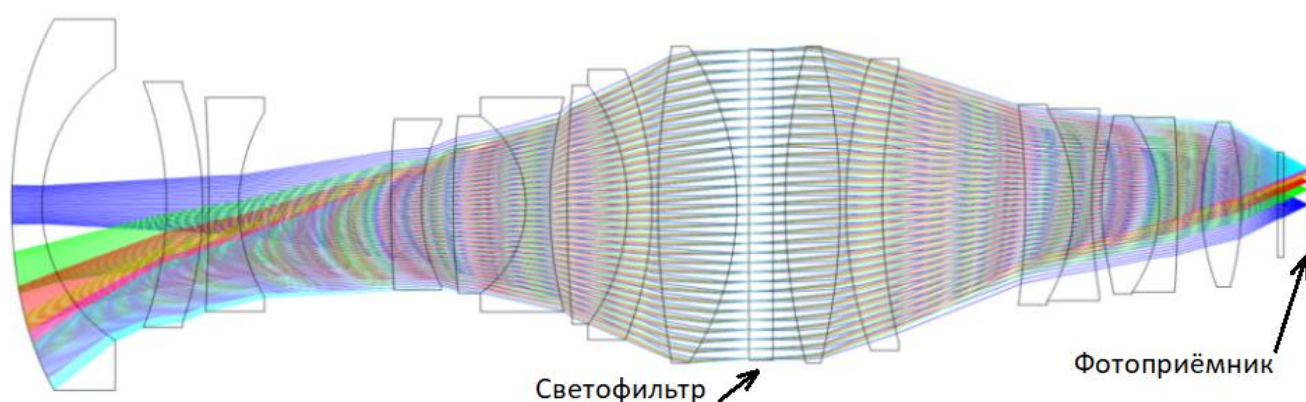


Рисунок 2.33. Оптический выпуск объектива ООО «Макрооптика».

Характеристики модельного объектива приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Характеристики модельного объектива ООО «Макрооптика»

Параметр	Обозначение	Значение
Фокусное расстояние, мм	$f_{\text{мод}}$	7,0
Относительное отверстие D/f	$(D/f)_{\text{мод}}$	1/1,1
Количество линз	-	16
Диаметр светофильтра, мм	$d_{\text{сф_мод}}$	53
Длина от первой оптической поверхности до фокальной плоскости, мм	$L_{\text{мод}}$	214
Масса без корпуса, кг	$m_{\text{мод}}$	0,49

Для оценки массогабаритных характеристик будем пользоваться методом масштабирования оптической схемы, описанном в [46]. Пусть известно фокусное расстояние объектива f , создаваемого для камеры ОЭБ, относительное отверстие D/f . Тогда длина создаваемого объектива, очевидно, не зависит от относительного отверстия и описывается формулой (2.30):

$$L = \frac{f}{f_{\text{мод}}} \cdot L_{\text{мод}} \quad (2.30)$$

Диаметр светофильтра создаваемого объектива зависит и от фокусного расстояния, и от относительного отверстия. Но при уменьшении диаметра оптической схемы её увеличение Γ не изменится. Тогда:

$$d_{\text{сф}} = \frac{\left(\frac{D}{f}\right)}{\left(\frac{D}{f}\right)_{\text{мод}}} \cdot \frac{f}{f_{\text{мод}}} \cdot d_{\text{сф_мод}} \quad (2.31)$$

Масса объектива, тем не менее, изменится более сложным образом. Из рисунка 2.33 видно, что при уменьшении относительного отверстия объектива можно снизить диаметр только его средних элементов: светофильтра и примыкающих линз. Именно они определяют светосилу. Но уменьшать диаметр входного окна в объективах данной конструкции нельзя, так как это приведёт к уменьшению не только D/f , но и поля зрения. Если на рисунке 2.33 уменьшить диаметр внешней линзы объектива при сохранении f , то крайний пучок лучей не попадёт в объектив. Следовательно, изменение массы объектива данной конструкции при его масштабировании можно только оценить.

Разделим все линзы в объективе на две группы. В группе №1 диаметр линз меняется только при изменении f , изменение относительного отверстия не приводит к изменениям их размеров. К этой группе отнесём 6 левых линз. В группе №2 диаметр линз меняется и при изменении f , и при изменении относительного отверстия. К этой группе отнесём 10 правых линз. Предположим

далее, что массы обеих групп равны (визуально на рисунке примерно равны суммарные площади сечений линз каждой из двух групп).

Тогда:

$$\begin{aligned}
 m = m_1 + m_2 &= \left(\frac{f}{f_{\text{мод}}}\right)^3 \cdot m_{1\text{-мод}} + \left(\frac{\left(\frac{D}{f}\right)}{\left(\frac{D}{f}\right)_{\text{мод}}}\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{f_{\text{мод}}}\right)^3 \cdot m_{2\text{-мод}} = \\
 &= \frac{1}{2} \cdot m_{\text{мод}} \cdot \left(\frac{f}{f_{\text{мод}}}\right)^3 \cdot \left(1 + \left(\frac{\left(\frac{D}{f}\right)}{\left(\frac{D}{f}\right)_{\text{мод}}}\right)^2\right)
 \end{aligned}
 \tag{2.32}$$

Таким образом, появляется возможность оценить массогабаритные характеристики обоих вариантов объектива для камеры ОЭБ.

Для полноты расчётов необходимо также оценить массу корпуса объектива. Примем в нашей модели, что корпус объектива представляет собой трубу из алюминия с толщиной стенок 2 мм, диаметром, равном диаметру светофильтра и длине, равной длине оптической системы.

Результаты оценки характеристик приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Параметр	Значение	
	№1	№2
Фокусное расстояние объектива, мм	9,31	4,32
Относительное отверстие объектива	1/1,8	1/1,35
Диаметр светофильтра, мм	36	28
Длина оптической системы от первой поверхности до фокальной плоскости, мм	284,6	132,1
Масса линзового комплекта, кг	0,8	0,1
Масса корпуса, кг	0,18	0,07

2.8.2. Оптико-электронный преобразователь

Для изоляции от внешних посторонних частиц при сборке и улучшения теплоотвода оптико-электронный преобразователь целесообразно выполнять герметичным [47]. Соответственно, над КМОП-фотоприёмником должно находиться защитное стекло, разделяющее герметичный объем оптико-электронного преобразователя и негерметичный объектив. Оно должно выдерживать перепад давлений 1 атмосфера и в то же время не оказывать своими деформациями заметного влияния на ход лучей. Определение параметров оптического стекла следует выполнять с учётом характеристик объектива, так как в сходящемся пучке даже плоскопараллельная пластинка создаёт искажение.

Выводы по главе 2

В главе 2 приведено обоснование аппаратного облика ПАК ДМ и его ключевых характеристик: рабочего спектрального диапазона светофильтра, оптической схемы, типа фотоприёмника. Показано, что наиболее перспективным вариантом является использование КМОП-фотоприёмника, так как именно он воплощает в себе идеологию «прибор на кристалле», являющуюся одной из главных тенденций приборостроения. Проведён анализ реальных фотоприёмников, пригодных для использования в оптико-электронном блоке. Установлено, что фотоприёмники с малой зарядовой вместимостью пикселя требуют крайне узкой полосы пропускания светофильтра, а она, в свою очередь, ограничена производственной базой и точностью средств контроля. Таким образом, предпочтительно использование КМОП-фотоприёмников с размером пикселя не менее 12 мкм и зарядовой вместимостью не менее 25000 электронов. Выполнен анализ возможных сочетаний характеристик оптической системы с учётом возможностей производственной базы узкополосных светофильтров. Сделаны расчёты сигнала и соотношения сигнал/шум для различных условий съёмки, показывающие принципиальную возможность создания ПАК ДМ, решающего задачу обнаружения вспышек молний. Создан и опробован способ оценки массогабаритных характеристик оптической системы. Это позволило провести расчёт характеристик системы и определить её конструктивный облик.

ГЛАВА 3. ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ

3.1. Распределение этапов обработки снимков между оптическим блоком, блоком обработки и наземными системами

Обработка информации в ПАК ДМ может быть организована по трём принципам:

- 1) Вся обработка производится непосредственно в камере ОЭБ, в блок обработки по кабелям передаётся только массив данных о вспышках молний;
- 2) В камере не производится никакой обработки снимков. Все исходные (небинированные) кадры передаются по кабелям в блок обработки;
- 3) В камере производится только предварительная обработка, например, бинирование снимка при работе в режиме съёмки молний.

При размещении на МКС камера ОЭБ, в отличие от блока обработки, находится в незащищённом объёме. Следовательно, проведение всей обработки в ней потребует использования радиационно-стойкого мощного процессора. Это сопряжено с проблемами стоимости высоконадёжной элементной базы. Кроме того, работа мощного процессора непосредственно в камере породит проблему теплоотвода.

Рассмотрим второй вариант: когда все небинированные снимки без какой-либо обработки передаются по кабелям. При размере фотоприёмника 768*768 пикселя, частоте кадров 1000 Гц и 10-разрядном АЦП получаем информационный поток $(768*768)[\text{пикселей/кадр}] * 1000[\text{кадров/с}] * 10[\text{бит/пиксель}] = 5625$ Мбит/с. С учётом характерной пропускной способности информационного коаксиального кабеля 200 Мбит/с получаем, что для передачи потребуется $5625/200 = 28$ кабелей. Такое количество кабелей приведёт к сложностям конструктивного исполнения ПАК ДМ и большой массе комплекса.

Таким образом, в качестве реализуемого варианта остаётся третий: когда бинирование снимков происходит непосредственно в камере ОЭБ, а дальнейшая

обработка и выделение молний – в блоке обработки. При размере фотоприёмника 768*768 пикселя, частоте кадров 1000 Гц, бинировании (или усреднении) 8*8 пикселей и 10-разрядном АЦП получаем информационный поток:

$$(768*768 / 64)[\text{пикселей/кадр}] * 1000[\text{кадров/с}] * 10[\text{бит/пиксель}] = 87,9 \text{ Мбит/с.}$$

С учётом характерной пропускной способности информационного коаксиального кабеля 200 Мбит/с для передачи потребуется только 1 кабель. В то же время в камере производится сравнительно маленький объём вычислений, что позволяет избежать необходимости использования радиационно-стойкого процессора с большой производительностью.

3.2. Алгоритм обработки снимков

3.2.1. Последовательность проверки пикселя по критериям обнаружения отблеска

Для повышения научной ценности данных, получаемых ПАК ДМ, целесообразно проводить обработку снимков как можно скорее после съёмки. Следовательно, возникает необходимость в создании алгоритмов выделения вспышек, которые будут работать непосредственно на борту. В случае наземной обработки возникает большой временной промежуток между съёмкой и передачей на Землю полученных снимков. Кроме того, вследствие круглосуточной работы ПАК ДМ суммарный объём необработанных данных будет несоразмерно большим с пропускной способностью радиолиний КА.

На вход алгоритма подаётся изображение с порядковым номером N. Изображение, поступившее на вход, имеет размер A строк * B столбцов. Момент съёмки соответствует порядковому номеру изображения N. Например, при формате исходного кадра 768*768 пикселей (и бинировании 8*8) на вход алгоритма подаётся снимок 96*96 пикселей.

Алгоритм автоматической обработки снимков имеет следующие этапы [48]:

- 1) Вычисление **расчётного** сигнала фона (одно для всех пикселей) на основе данных по текущему возвышению Солнца h_s . Задаётся вопросом: какой здесь был бы сигнал, если бы в пикселе было облако? Сравнение с

- фактическим фоном** отсекает пиксели, где сигнал намного меньше, чем у облаков (над территорией, не покрытой облаками, молнии **бывают крайне редко**). Отсечка основана на том, что альbedo облаков $\rho_0=0,8$ (точнее, колеблется от 0,6 до 0,8), тогда как альbedo местности, как правило, не превышает 0,4. Спектральная плотность освещённости верхней границы облаков известна: $E_{\text{вг}}|_{\lambda=0,777 \text{ мкм}} = 1377 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$, как и время накопления сигнала $T_n = 1 \text{ мс}$ (при кадровой частоте 1000 Гц). Чувствительность камеры S имеет размерность [уровни АЦП/(Дж/м²)] и измеряется в процессе наземных испытаний ОЭБ. Вообще говоря, S имеет разные значения для каждого пикселя кадра вследствие виньетирования в объективе и неодинаковых свойств пикселей камеры. Необходимость установления для каждого пикселя своего собственного значения $S(i,j)$ определяется на этапе наземных испытаний по результатам фотометрической калибровки ОЭБ. Следует отметить, что при вводе величины $S(i,j)$ вычислительная сложность алгоритма резко возрастёт, так как на этапе п.1. будет выполняться не 5 умножений вещественных чисел (для всего изображения сразу), а $5 \cdot A \cdot B$ умножений (для каждого пикселя).
- 2) Вычисление **фактического** фона по $M=64$ предыдущим снимкам для каждого пикселя (i,j) (по пикселям с теми же координатами i,j). Обоснование величины M будет приведено ниже (п. 3.5). При обработке снимка с номером N вычисление фона происходит для снимка с номером $N+1$. Для текущего же снимка фактический фон был вычислен при обработке снимка с номером $N-1$ (предыдущий снимок). Необходимо отметить, что первые **65 снимков** используются только для наработки фона («разгон» алгоритма). Таким образом, **первый** снимок, где идёт поиск отблесков, имеет номер **$N=66$** .
 - 3) Далее идёт пробегание каждого пикселя (i,j) изображения с номером N . Для каждого пикселя выполняются проверки пп. 4-7. Крайние столбцы и строки не пробегаются: то есть $1 < i < A$ и $1 < j < B$.
 - 4) Если сигнал U в рассматриваемом пикселе i,j **превышает** фоновый на некоторое **пороговое значение** (2...4 уровня АЦП), то имеем кандидата на

вспышку молнии. Пороговое значение может уточняться и регулироваться в процессе лётных испытаний и эксплуатации ПАК ДМ .

- 5) Проводим опрос соседних (**по пространству**) пикселей того же снимка N . Если нет ни одного соседа, так же преодолевшего порог, то исключаем наш пиксель i,j из дальнейшего рассмотрения. Критерий отсечки основан на том, что проекция бинированного пикселя составляет $4...5,5$ км, тогда как пятно от вспышки молнии имеет диаметр не менее 15 км. Значит, можно считать, что изображение отблеска всегда занимает **более, чем один пиксель**. А одиночный пиксель, преодолевший порог – это всего лишь шумовой выброс. Именно вследствие необходимости проверки **всех** 8 соседей, из пробегания в п.3. исключены крайние строки и столбцы снимка.
- 6) Теперь осталось исключить искусственные источники света, блики и т.д. Если в п.5. проверка проводилась по пространству, то теперь **исследуем временную зависимость** сигнала. Так как кадровая частота составляет 1000 Гц, то свечение отблеска молнии должна занимать не более, чем 2 последовательных по времени кадра. Проводим опрос пикселей с теми же координатами i,j в четырёх снимках: 2 предыдущих ($N-2$ и $N-1$) и 1 последующем ($N+1$) по времени снимках. Если превышение порога наблюдается и в предыдущем, и в следующем снимке, то событие имеет длительность более 1 мс. Но известно, что **все** импульсы молний продолжаются не более 1 мс, а большинство их по длительности не превосходит 500 мкс. Тогда данное событие относится к другим физическим явлениям и не является вспышкой молнии.
- 7) Отметим, что в алгоритме не используется признак «наличие пикселя-кандидата в одной и той же точке (i,j) на двух и более снимках, интервал времени между которыми от 2 до 50 мс». Это связано с тем, что около 15% молний состоят только из одного светового импульса [17]. Соответственно, появление такого критерия сразу снижает эффективность выявления молний до $\leq 85\%$.

- 8) Для корректного решения задачи пространственной привязки отблесков необходимо выполнить пересчёт координат выявленной вспышки (i,j) с учётом дисторсии объектива, достигающей величины более 10% в углу кадра. На этапе наземных испытаний для каждого пикселя фотоприёмника формируется таблица поправочных коэффициентов $k_x(i,j)$ и $k_y(i,j)$. Далее будем говорить о координатах, прошедших пересчёт с учётом дисторсии объектива.
- 9) Если кандидат преодолел проверку в п.6., то считаем это событие **отблеском** молнии и предварительно **записываем** характеристики $[j][i][T][U_m][U_\phi]$ (координаты на фотоприёмнике, момент считывания, сигналы от отблеска молнии и фона). После чего переходим в алгоритме к следующему пикселю.
- 10) Последним этапом обработки кадра является **объединение** соседних пикселей, прошедших проверки алгоритмом, в **единый отблеск**. Дело в том, что без этого соседние пиксели, относящиеся к **одному отблеску**, будут сохранены в памяти блока обработки как **разные** события. Координаты x и y вспышки определяются методом поиска центра масс результирующего пятна. Время светового импульса t определяется как среднее арифметическое от моментов времени T (моменты считывания каждого из пикселей, где выявлена вспышка).
- 11) Каждый отблеск записывается в память блока обработки в следующем формате: $[x][y][t][U_m][U_\phi][s][d][H]$.
- Состав переменных массива описан в таблице 3.2. Все переменные можно разделить на две группы: целевые параметры и навигационные параметры. Целевые параметры описывают характеристики вспышки. Навигационные параметры описывают орбитальное положение КА, соответствующее моменту регистрации данного отблеска. Отметим, что их состав может быть дополнен (например, углами ориентирования КА). Возможно также произвести объединение нескольких выявленных отблесков, созданных световыми импульсами, в единую серию – молнию.

3.2.2. Блок-схема алгоритма

Блок схема алгоритма приведена на рисунке 3.1. Кроме того, для наглядности некоторые этапы обработки модельных изображений по описанному алгоритму показаны на рисунках в таблице 3.1.

На рисунке 3.1. приняты следующие обозначения:

$d\lambda$ - ширина спектрального диапазона светофильтра, мкм;

S - чувствительность камеры, уровни АЦП/(Дж/м²);

T_n - время накопления, с;

$N = N(t)$ - привязка номера снимка к моменту времени t ;

$E_{\text{вга}} = 1377 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$ - спектральная плотность светового потока от Солнца на верхней границе атмосферы (ВГА) при длине волны 777 нм;

$h_s(t)$ - угол возвышения Солнца над горизонтом в момент времени t .

Рассчитывается с учётом параметров орбиты. На теневой стороне орбиты $h_s = 0$;

$\tau_0 = 0,8$ - альбедо облаков.

$Fon(N,i,j)$ - фактический фон в пикселе (i,j) для изображения с порядковым номером N , [уровни АЦП]
 Первые 64 снимка используются только для наработки фона: $Fon(64,i,j) = (1/64) * Sum(64,i,j)$ - 10-битное целое число
 где $Sum(64,i,j) = (U(1,i,j) + U(2,i,j) + \dots + U(64,i,j))$ - 16-битное целое число
 Далее вычисляется фон для каждого пикселя снимков $N=65, N=66$:
 $Fon(N,i,j) = (1/64) * Sum(N,i,j)$, где $Sum(N,i,j) = Sum(N-1,i,j) - U(N-64,i,j) + U(N,i,j)$

Таким образом, поиск молний начинается со снимка $N=66$
 К моменту поступления на обработку снимка с номером N в памяти хранятся 6 массивов:
 3 фоновых кадра ($Fon(N-2, \dots, \dots)$; $Fon(N-1, \dots, \dots)$; $Fon(N, \dots, \dots)$) и 3 фоновых суммы ($Sum(N-2, \dots, \dots)$; $Sum(N-1, \dots, \dots)$; $Sum(N, \dots, \dots)$)
 Также в "быстрой" памяти должны храниться 63 предыдущих снимка $U(N-63, \dots, \dots)$ $U(N-1, \dots, \dots)$ и 1 последующий $U(N+1, \dots, \dots)$

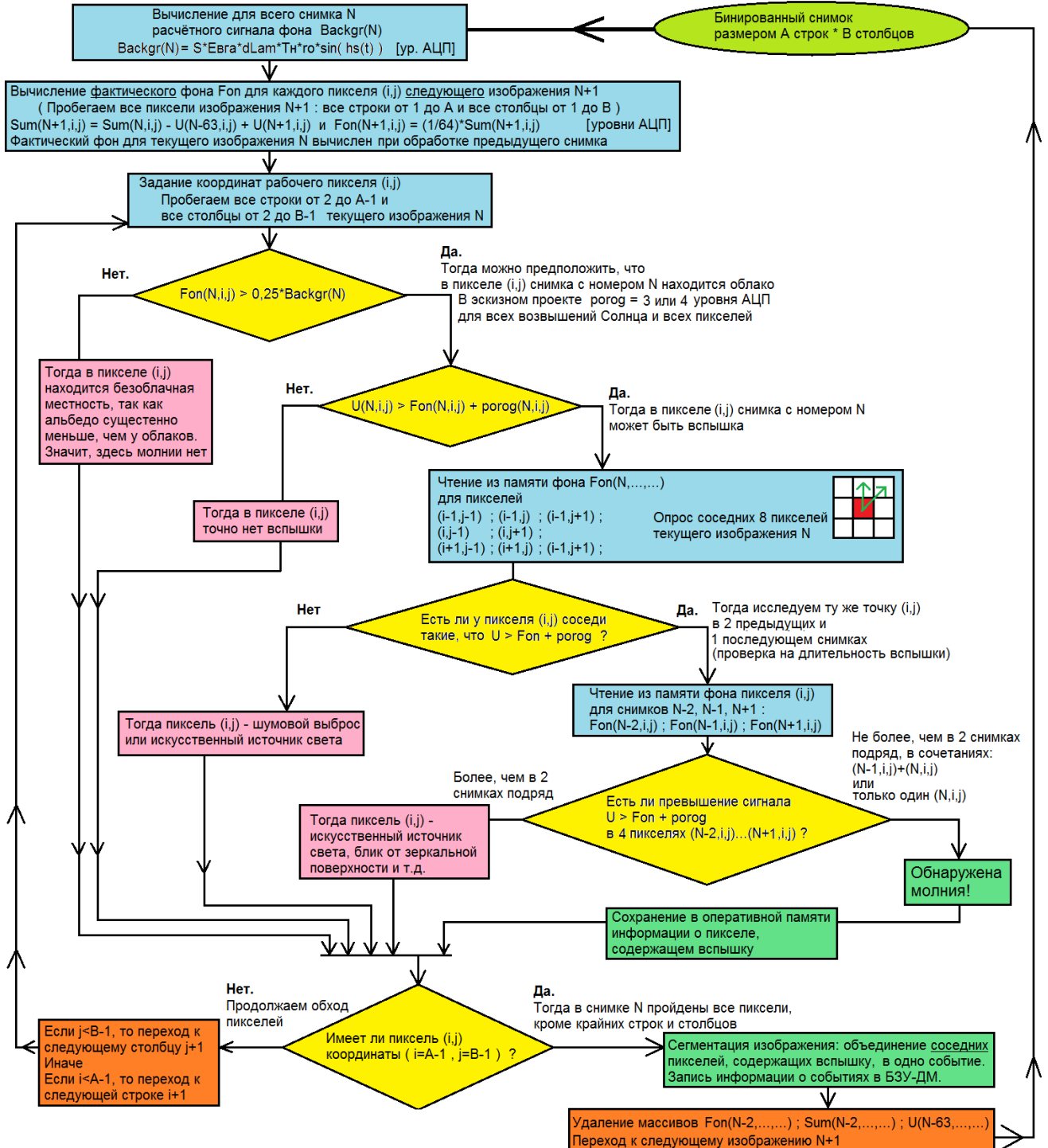


Рисунок 3.1. Блок-схема алгоритма обработки снимков в ПАК ДМ.

Таблица 3.1. Визуализация этапов обработки снимков на примере модельных изображений.

№ этапа	Название этапа	Рисунок	Комментарии
0	Исходный снимок после бинирования в камере		36 заранее наложенных отблесков не видны визуально, т.к. днём их яркости в ~ 100 раз меньше яркости облаков (фона)
2	Вычисление фактического фона по предшествующим снимкам для каждого пикселя (для наглядности фон вычтен)		После вычитания фона 36 отблесков видны визуально, но на снимке имеется также много ложных отблесков: это шумовые выбросы, оставшиеся после удаления фона
4	Проверка на преодоление порога		Некоторые шумовые выбросы настолько большие, что преодолели фильтрацию по порогу
5	Опрос пространственных соседей каждого пикселя		Одиночные шумовые выбросы отсеяны, т.к. истинная вспышка должна занимать несколько смежных пикселей. Видно, что кроме 36 истинных отблесков остались 8 ложных: величина порога в данном примере недостаточно большая

Таблица 3.2. Структура массива выходных данных

Величина	Физический смысл	Размерность	Диапазон значений	Объём памяти, байт	Примечание
Целевые параметры					
x	Координаты отблеска в матричной СК	Бинир. пиксель	$1 \leq x \leq A$	1	Определяются взвешиванием координат всех пикселей вспышки
y			$1 \leq y \leq B$	1	
T	Момент времени одиночного импульса	секунды		5	Определяется с учётом поправки $dT(i,j)$ из ТВП
U_м	Сигнал от отблеска	Уровни АЦП	$1 < U_m \leq 1023$	2	
U_ф	Сигнал от фона	целые	$0 \leq U_m \leq 1022$	2	
Навигационные параметры					
s	Широта подспутниковой точки КА	градусы	-	2	Диапазон соответствует наклонению орбиты КА
d	Долгота подспутниковой точки КА	градусы	от -180 до +180 градусов	2	
H	Высота КА относительно орбиты 350 км	км	От 0 до 127,5 км	1	Относительно 350 км
Примечания:					
<p>- Сигналы U_m и U_f поступают в блок обработки виде 10-битных чисел, каждое из них при записи в память дополняется нулями до размера 2 байта.</p> <p>- Величины s, d, H поступают в блок обработки по интерфейсам взаимодействия с системами КА. Для экономии памяти в качестве высоты H пишется превышение относительно высоты орбиты 350 км с точностью 0,5 км. Таким образом, доступные значения H: 350 км; 350,5 км ;...; 477,5 км.</p> <p>- Также к массиву данных о вспышке могут быть добавлены величины углов ориентации КА.</p>					

Соответственно, общий объём памяти на 1 отблеск: 16 байт. Объём рассчитан для целевой информации, без учёта служебной информации (меток начала и конца, битов чётности, контрольных сумм и т.д.).

Например, при обработке изображения алгоритм выявил 2 соседних пикселя $[j][i][T][U_m][U_\phi]$. Так как они являются соседями, то относятся к одному пятну от вспышки: $[1][1][2000,5][310][300]$ и $[2][1][2000,7][309][298]$. Считывание их произошло в моменты времени $T=2000,5$ мс и $T=2000,7$ мс. В этот момент координаты КА были следующими: широта $s=+10^\circ$, долгота $d=-100^\circ$ и высота орбиты 420 км, что соответствует $H = 70$ км (относительно орбиты 350 км).

Тогда в память блока обработки запишутся следующие данные: $[1,5][1][2000,6][310][299][+10][-100][70]$.

3.3. Уточнение временной привязки

Отметим важный момент, касающийся определения **момента импульса**. Считывание всех первичных пикселей с фотоприёмника, вообще говоря, происходит не одновременно. Он разбит на некоторое количество блоков, считывание с которых происходит параллельно. Тогда каждому бинированному пикселю будет соответствовать некоторая временная поправка $dT(i,j)$. Физический смысл её определяется как $Tread(i,j) = Tread(1,1) + dT(i,j)$, где:

$Tread(i,j)$ – момент времени, соответствующий считыванию бинированного пикселя (i,j) . Определяется как среднее значение моментов считывания НЕбинированных пикселей, входящих в состав бинированного пикселя (i,j) .

$Tread(1,1)$ – момент считывания бинированного пикселя $(1,1)$. Определяется как среднее значение моментов считывания НЕбинированных пикселей, входящих в состав бинированного пикселя $(1,1)$.

Отметим, что поправка $dT(i,j)$ определяется в процессе наземных испытаний для каждого пикселя и сохраняется в ТВП – таблицу временных поправок. Для пояснения идеи ТВП приведём такой пример:

Пусть фотоприёмник имеет формат 9*9 исходных пикселей, а считывание происходит построчно, причём параллельно по 3 горизонтальным секциям матрицы: верхней, средней и нижней. Время считывания одного исходного пикселя составляет 1 мкс. В данном примере бинирование при обработке выполняется в виде 3*3 пикселя.

Моменты считывания пикселей исходного снимка (в мкс):

0	1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24	25	26
0	1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24	25	26
0	1	2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24	25	26

Тогда для бинированного снимка размером 3*3 пикселя таблица ТВП примет следующий вид:

10	13	16
10	13	16
10	13	16

Например:

$$dT(1,1) = (1/9)*(0+1+2+9+10+11+18+19+20) = 10 \text{ мкс}$$

$$dT(1,2) = (1/9)*(3+4+5+12+13+14+21+22+23) = 13 \text{ мкс}$$

3.4. Методы вычисления фактического фона

Отдельной задачей является выбор и обоснование метода вычисления фактического фона. Ключевыми критериями здесь являются вычислительная сложность и устойчивость к шумовым выбросам.

3.4.1. Усреднение

Усреднение сигнала с M предшествующих снимков в пикселе (i,j) снимка с номером N является наиболее простым способом формирования фонового сигнала.

$$Fon(i, j, N) = \frac{U(i, j, N - M - 1) + \dots + U(i, j, N - 1)}{M} \quad (3.1)$$

Ключевую проблему здесь представляет вычислительная сложность задачи. Количество необходимых в этом случае операций можно оценить как 1 деление на целое число и $M-1$ сложений. Кроме того, данный метод требует хранения в быстродействующей оперативной памяти M массивов размером $i*j$ элементов каждый.

3.4.2. Скользящее среднее

Данный способ проще усреднения с точки зрения вычислений. Допустим, нужно вычислить фон в пикселе (i,j) снимка с номером N . Тогда:

$$Fon(i, j, N) = (M - 1) \cdot Fon(i, j, N - 1) + \frac{U(i, j, N - 1)}{M} \quad (3.2)$$

Анализ формулы (3.2) позволяет оценить число операций как 1 умножение на целое число, 1 деление на целое число и 1 сложение. В оперативной памяти нужно хранить 2 массивов размером $i*j$ элементов каждый. Основной проблемой здесь является накопление вычислительной ошибки. Величины сигналов Fon и U являются целночисленными, следовательно, при каждом округлении будет иметь место возрастание ошибки. С учётом характерной величины порога 3...5 уровней АЦП это приведёт к быстрому прекращению правильной работы алгоритма.

3.4.3. Промежуточные суммы

Рассмотрим следующий принцип вычисления фактического фона в пикселе (i,j) снимка с номером N.

$$Fon(i, j, N) = \frac{1}{M} \cdot Sum(i, j, N) \quad (3.3)$$

При этом промежуточная сумма Sum(i,j,N) определяется как :

$$Sum(i, j, N) = Sum(i, j, N - 1) - U(i, j, N - M - 1) + U(i, j, N) \quad (3.4)$$

Первые M снимков используются для «разгона» алгоритма, тогда:

$$Sum(i, j, M + 1) = \frac{U(i, j, 1) + \dots + U(i, j, M)}{M} \quad (3.5)$$

В данном методе требуется 2 сложения и 1 деление на целое число. Однако, как и при обычном усреднении, здесь требуется большой объём быстродействующей памяти, так как в ней должны храниться M+2 массивов размером i*j элементов каждый.

3.4.4. Медианное значение

Также фоновое значение сигнала можно определять как медиану от сигналов в пикселе (i,j) M предшествующих снимков:

$$Fon(i, j, N) = med(U(i, j, N - M - 1) + \dots + U(i, j, N - 1)) \quad (3.6)$$

Данный метод имеет неоспоримое достоинство: он гораздо менее чувствителен к шумовым выбросам и наличию вспышек в предшествующих снимках, чем методы, основанные на суммировании предыдущих кадров. Однако вычисление медианы является весьма трудоёмкой операцией в вычислительном отношении, поэтому данный метод значительно повышает требования к производительности блока обработки.

Анализируя описанные выше способы, можно сказать, что метод с вычислением промежуточных сумм является наиболее предпочтительным.

3.5. Определение количества усредняемых снимков при вычислении фактического фона

Определим, сколько предшествующих кадров необходимы для накопления **фактического фона**. С одной стороны, чем больше M , тем меньше ошибка фона. Но, при большой величине M получится, что изображение сдвинулось на значительное расстояние, а, значит, фон успел измениться.

Линейная скорость низкоорбитального КА $V_{\text{орб}}$ находится по формуле (3.7):

$$V_{\text{орб}} = \sqrt{\frac{GM_{\text{зем}}}{R_{\text{зем}} + H}} \quad (3.7)$$

где:

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ – гравитационная постоянная;

$M_{\text{зем}} = 5,97 \cdot 10^{24}$ кг – масса Земли;

$R_{\text{зем}} = 6370 \cdot 10^3$ м – радиус Земли;

$H = 450 \cdot 10^3$ м – высота орбиты

Тогда скорость подспутниковой точки $V_{\text{пст}}$ имеет вид (3.8)

$$V_{\text{пст}} = \frac{R_{\text{зем}}}{R_{\text{зем}} + H} \cdot V_{\text{орб}} = \frac{R_{\text{зем}}}{R_{\text{зем}} + H} \cdot \sqrt{\frac{GM}{R_{\text{зем}} + H}} \quad (3.8)$$

С учётом (3.8) скорость движения изображения в фокальной плоскости $V_{\text{сди}}$ определяется формулой (3.9):

$$V_{\text{сди}} = \frac{f}{H} \cdot V_{\text{пст}} \quad (3.9)$$

где:

f – фокусное расстояние объектива;

Тогда время сдвига изображения $T_{\text{стр}}$ на один исходный пиксель размером δ определяется формулой (3.10):

$$T_{\text{стр}} = \frac{\delta}{V_{\text{сди}}} = \frac{\delta}{\frac{f}{H} \cdot V_{\text{пст}}} = \frac{H}{f} \cdot \delta \cdot \frac{1}{V_{\text{пст}}} = \frac{L_{\text{пикс}}}{V_{\text{пст}}} \quad (3.10)$$

Где $L_{\text{пикс}}$ – проекция исходного пикселя

Для проекции пикселя 677 метров получим, что сдвиг изображения на один исходный пиксель произойдёт за время 91,6 мс.

Примем, что допустимым является смещение фона не более чем на треть **бинированного** пикселя. При бинировании 8*8 пикселей получим, что такой сдвиг накопится за время $91*(8/3) = 243$ мс. Получаем, что M не должно превышать 242 при частоте кадров 1000 Гц и проекции пикселя 677 м.

Исходя из энергетического расчёта, для отблеска молнии с яркостью $10 \text{ мкДж}/(\text{м}^2*\text{ср})$ превышение сигнала над фоновым будет не более 12 уровней АЦП (при лучшей временной фазе). Предположим, что для вычисления фона используются M предшествующих кадров, и в одном из них есть вспышка молнии с сигналом $U_{\text{мол}} = U_{\text{фон}} + 12$ [уровней АЦП]. Тогда M должно быть таким, чтобы при усреднении сигнала молния дала ошибку среднего менее

$\text{Err} = 0,5$ уровня АЦП, чтобы при округлении не было искажения данных о фоне. Значит, $U_{\text{фон}} + \text{Err} = (1/M)*(M-1)*U_{\text{фон}} + U_{\text{мол}}$.

Тогда:

$$U_{\text{фон}} + \text{Err} = ((M-1)/M)*U_{\text{фон}} + U_{\text{мол}}/M$$

$$U_{\text{фон}} + \text{Err} = U_{\text{фон}} - U_{\text{фон}}/M + U_{\text{мол}}/M$$

$$U_{\text{фон}} + \text{Err} = U_{\text{фон}} - (U_{\text{фон}} - U_{\text{мол}})/M$$

$$\text{Err} = -(U_{\text{фон}} - U_{\text{мол}})/M$$

$$M = (U_{\text{мол}} - U_{\text{фон}})/\text{Err} = 12/0,5 = 24$$

Сделаем запас на то, что молнии могут быть и ярче модельной. Кроме того, для ускорения вычислений желательно, чтобы M было целой степенью числа 2. Примем, что усреднение для получения фактического фона идёт по $M=64$ предшествующим снимкам. Проведя обратные вычисления, получаем, что ошибки фактического фона в 1 уровень АЦП не будет при **разностном** сигнале от отблеска молнии $U_{\text{мол}} - U_{\text{фон}} \leq 31$ уровней АЦП, что соответствует яркости $26 \text{ мкДж}/(\text{м}^2*\text{ср})$ в наилучшей временной фазе и $52 \text{ мкДж}/(\text{м}^2*\text{ср})$ в наихудшей фазе.

3.6 Оценка вероятности обнаружения молнии

Проведём оценку вероятности обнаружения молнии алгоритмом. При интегральной яркости отблеска $B_{\text{мол}}$ [Дж/(м²*ср)], крутизне преобразования АЦП A [электрон/ур. АЦП], соотношении сигнал/шум $SNR(B_{\text{мол}}, h_s, k_{\text{фазы}})$, СКО шума $\sigma(h_s)$ [электроны] и пороге обнаружения $porog$ [уровней АЦП] вероятность преодоления фильтрации по порогу одиночным пикселем отблеска можно оценить как:

$$P_{\text{од}}(B_{\text{мол}}, h_s) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{A \cdot (porog + \frac{1}{2})}^{\infty} e^{-\frac{(x - SNR \cdot \sigma)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx \quad (3.11)$$

Здесь интегрирование ведётся от величины $A \cdot (porog + \frac{1}{2})$, а не от $A \cdot porog$, так как необходимо учесть округление сигнала при его оцифровке (переводе из электронов в уровни АЦП). Подынтегральная функция представляет собой плотность распределения Гаусса с матожиданием, равным сигналу от отблеска $U_{\text{мол}} = SNR(B_{\text{мол}}, h_s, k_{\text{фазы}}) \cdot \sigma(h_s)$.

Тогда обнаружением истинного отблеска является событие, при котором порог будет преодолен хотя бы двумя смежными пикселями. Значит, из 8 соседей пикселя порог должен преодолеть хотя бы один. Следовательно, совместная вероятность определится как:

$$P_{\text{истин}}(porog, B_{\text{мол}}, h_s) = P_{\text{од}}(porog, B_{\text{мол}}, h_s) \cdot \left(1 - \left(1 - P_{\text{од}}(porog, B_{\text{мол}}, h_s)\right)^8\right) \quad (3.12)$$

Здесь учтено, что событие «преодоление порога хотя бы одним из соседей» является дополнительным к событию «никто из 8 соседей не преодолел порог», их суммарная вероятность равна 1.

Осталось определить вероятность обнаружения ложного отблеска. Она зависит только от СКО шума и величины порога в алгоритме обработки. Вероятность преодоления порога одиночным пикселем, не содержащим отблеск, определяется как:

$$P_{\text{фон}}(\text{porog}, h_s) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{A \cdot (\text{porog} - \frac{1}{2})}^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx \quad (3.13)$$

Тогда вероятность обнаружения ложного отблеска, по аналогии с расчётом для истинного отблеска, составит:

$$P_{\text{ложный}}(\text{porog}, h_s) = P_{\text{фон}}(\text{porog}, h_s) \cdot \left(1 - \left(1 - P_{\text{фон}}(\text{porog}, h_s)\right)^8\right) \quad (3.14)$$

На рисунке 3.2 показан графический смысл расчётов.

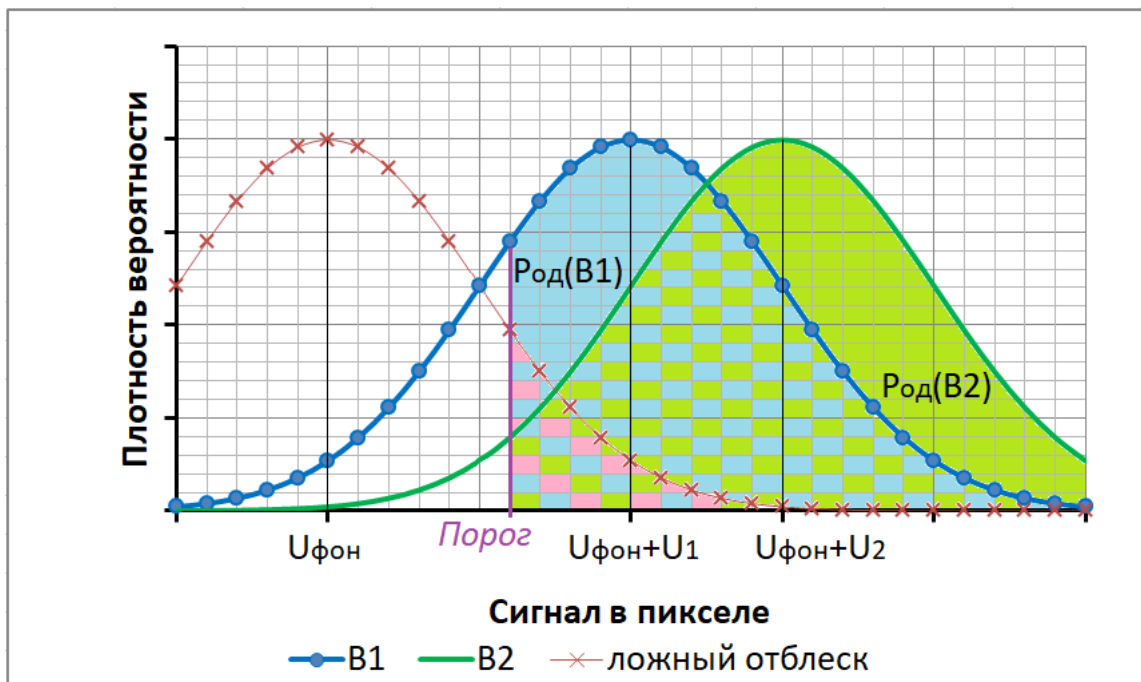


Рисунок 3.2. Графический смысл вероятностей преодоления порога истинным и ложным пикселями. В данном примере показаны плотности вероятности сигналов от двух истинных отблесков и сигнала от ложного отблеска. Соответствующие вероятности обнаружения представляют собой площади, ограниченные кривыми. Яркость отблеска 2 больше яркости отблеска 1.

Результаты расчётов для ПАК ДМ приведены на рисунках 3.3-3.4.

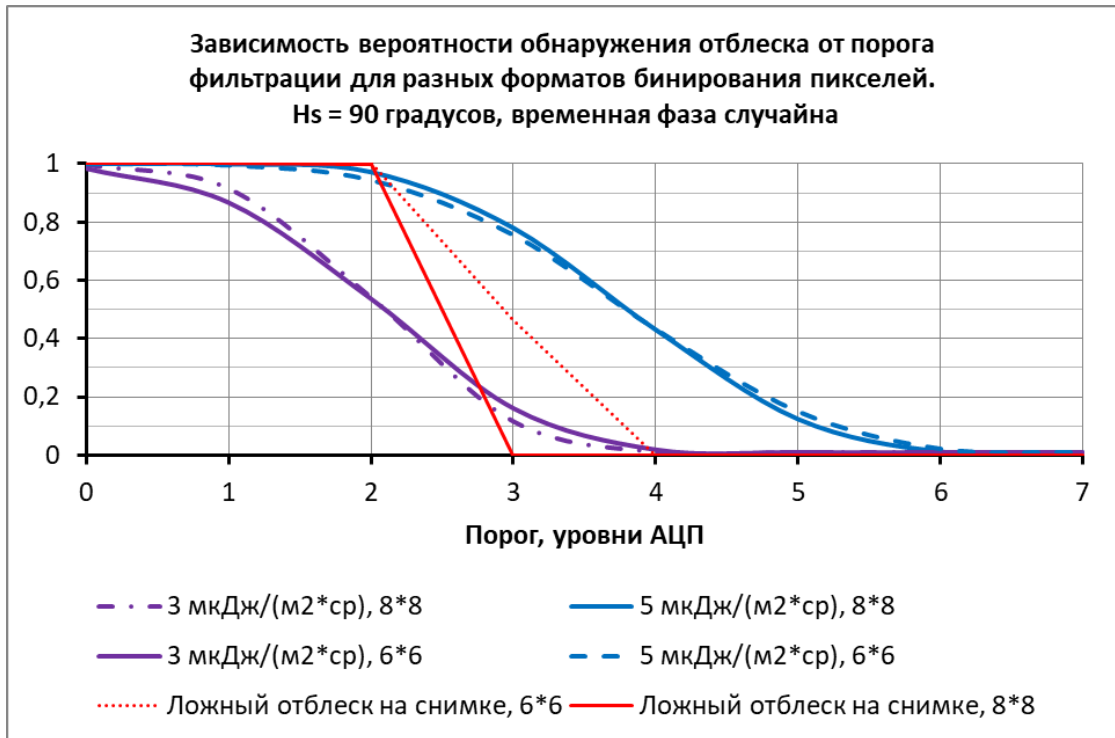


Рисунок 3.3. Результаты расчёта вероятностей обнаружения истинного и ложного отблесков для ПАК ДМ. Возвышение Солнца 90 градусов (наихудшие условия наблюдения).

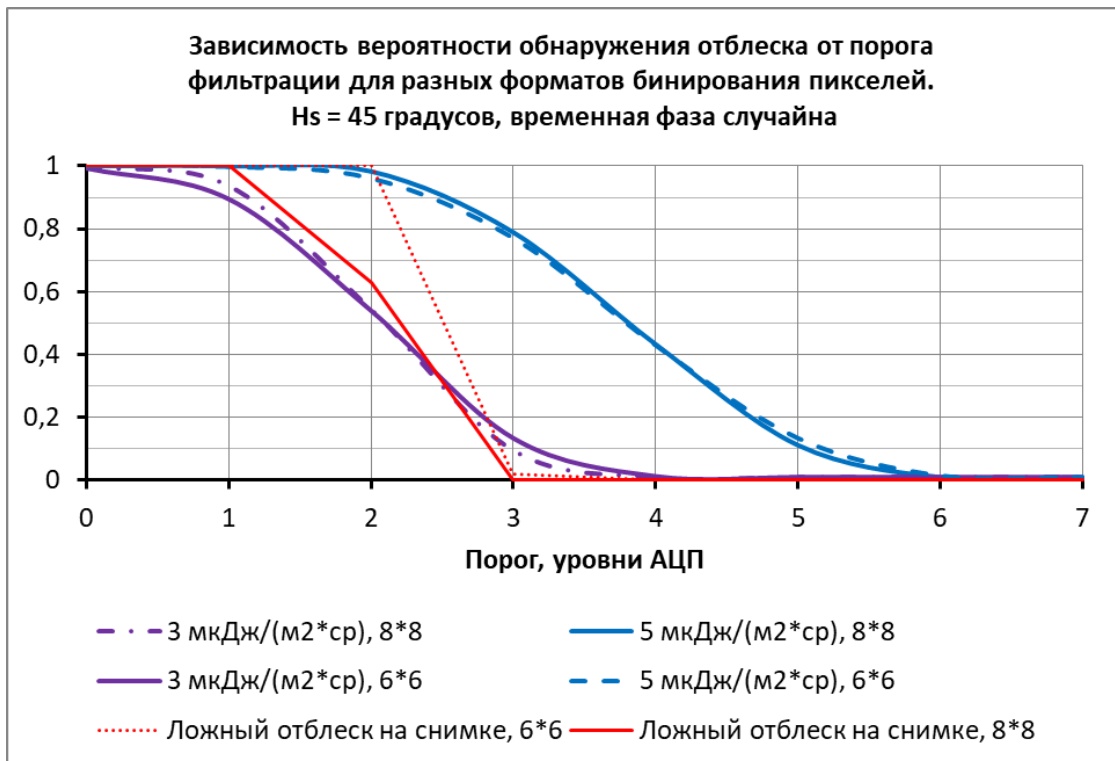


Рисунок 3.4. Результаты расчёта вероятностей обнаружения истинного и ложного отблесков для ПАК ДМ. Возвышение Солнца 45 градусов.

Из рисунка 3.4. видно, что при возвышениях Солнца 0...45 градусов порог фильтрации можно установить на уровне 3 ур. АЦП как для бинирования 8*8, так и 6*6, так как при нём выполняется требование на вероятность обнаружения ложного отблеска <1%. В таких условиях съёмки возможна работа с улучшенным пространственным разрешением (4 км при бинировании 6*6) : вероятности обнаружения истинного отблеска практически одинаковы для обоих размеров проекции пикселя: 79% и 80% для «типичного» отблеска. Наоборот, при сохранении величины бинирования 8*8 можно уменьшить кадровую частоту (до 700...750 Гц), что позволяет добиться увеличения формата кадра и полосы захвата ПАК ДМ. Формат кадра в этом случае может составлять ~880*880 исходных пикселей, что равносильно области обзора 600*600 км с угловым размером 67*67 градусов.

3.7. Оценка выходных информационных потоков

Оценим общий поток данных, получаемых ПАК ДМ. Пусть массив данных об одном отблеске занимает в памяти объём N байт, кадр имеет размер $a*b$ км², а интенсивность грозовой активности на снимаемой местности составляет n световых импульсов молний/(км²*с). Тогда общий поток (Байт/с) можно получить тривиальным образом:

$$I = N \cdot a \cdot b \cdot n \quad (3.15)$$

Однако в описанной задаче основной проблемой является нехватка исходных данных. Исходя из данных, полученных инструментами LIS и OTD, максимальная среднегодовая плотность потока молний составляет 250 молний/(км²*год) и соответствует месту впадения реки Кататумбо в озеро Маракайбо (Венесуэла) [49]. При этом количество грозовых дней в году составляет около 200. Тем не менее, вспышки распределены по времени неравномерно, следовательно, ориентироваться нужно на максимальную мгновенную интенсивность: именно она определяет требуемые быстродействие вычислительного модуля и информационный поток.

Для оценки можно предположить, что в данной местности ежедневное количество вспышек с единицы площади постоянное (климат в экваториальных районах слабо зависит от времени года). Кроме того, установлено, что наибольшая интенсивность вспышек Кататумбо наблюдается вечером и ночью: с 19:00 до 04:00 [49]. Тогда предположим, что половина всех суточных вспышек происходят именно в эти 9 часов. Как показано в разделе 1.2 Модель молнии, типичная молния содержит 10 световых импульсов. Оценим мгновенную интенсивность грозовой активности на снимаемой местности по формуле (3.16):

$$\begin{aligned} n_{\text{момент}} &= \\ &= 0,5 \cdot (1/9) \cdot 10 \cdot 250 \text{ отблесков}/(\text{км}^2 \cdot \text{год}) / 200 \text{ (грозовых дней/год)} = \quad (3.16) \\ &= 0,7 \text{ отблесков}/(\text{км}^2 \cdot \text{час}) = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ отблесков}/(\text{км}^2 \cdot \text{с}) \end{aligned}$$

При размере кадра $\sim 500 \cdot 500$ км поток регистрируемых отблесков составит $1,9 \cdot 10^{-4} [\text{отблесков}/(\text{км}^2 \cdot \text{с})] \cdot (500 \cdot 500) [\text{км}^2] = 47,5 \text{ отблесков/с} \sim 50 \text{ отблесков/с}$. С учётом того, что на один отблеск должно отводиться 16 Байт памяти, получаем максимальный общий поток данных 800 Байт/с.

Для оценки потребного объёма памяти прямое использование полученного результата даст завышенные результаты, так как средняя интенсивность вспышек на поверхности Земли намного меньше, чем 250 молний/ $(\text{км}^2 \cdot \text{год})$. Применим данные, полученные инструментами LIS и OTD: можно ожидать характерную интенсивность 10...20 молний/ $(\text{км}^2 \cdot \text{год})$ [23]. Тогда для средней суточной интенсивности: $(1/365) \cdot 15 \text{ молний}/(\text{км}^2 \cdot \text{год}) = 0,041 \text{ молний}/(\text{км}^2 \cdot \text{сутки})$. При кадре размером $500 \cdot 500$ км и 10 световых импульсах в молнии имеем 102500 импульсов/сутки. Это равносильно оценке суточного потока данных 1,5 Мбайт/сутки.

Исходя из полученного результата, можно оценить также требуемую ёмкость памяти блока обработки. Здесь определяющим условием является частота сеансов передачи данных на Землю p сеансов/сутки. Характерный интервал времени между наблюдениями одной и той же местности для низкоорбитальных КА ДЗЗ составляет 3 суток. Зададимся этой же величиной и для задачи оценки

частоты возможного нахождения в зоне радиовидимости наземного комплекса приёма информации. Тогда при сбросе данных, например, 1 раз в 3 суток имеем:

$$M = \frac{I \cdot T_{\text{сутки}}}{p} = 4,5 \text{ МБайт} \quad (3.17)$$

Выводы по главе 3

Полученные в главах 1-2 выводы о физической модели наблюдаемых вспышек и облике прибора обеспечили необходимые исходные данные для формирования программно-аналитической части ПАК ДМ. На их основе был создан алгоритм обработки изображений, позволяющий ПАК ДМ в режиме реального времени обнаруживать вспышки молний. Параметры алгоритма оптимизированы таким образом, чтобы, с одной стороны, повысить точность решения целевой задачи и в то же время не приводить к избыточно сложным решениям. В частности, показано, что для снижения нагрузки на вычислительный модуль целесообразно отказаться от нецелых чисел при вычислении фонового сигнала. Исследован вопрос об оптимальном методе усреднения снимков и установлено, что наилучшим с точки зрения вычислительной сложности является метод с вычислением промежуточных сумм. Также для оптимизации нагрузки на вычислительный модуль решена задача определения количества усредняемых снимков, необходимых для наработки фонового сигнала. Для формирования требований к радиолинии определены и обоснованы значения ожидаемого потока данных (800 Байт/с) и требуемой ёмкости памяти (4,5 МБайт).

ГЛАВА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И МАКЕТИРОВАНИЕ ПАК ДМ

4.1. Моделирование снимков с отблесками

Моделирование изображений проводилось на основе результатов энергетического расчёта ПАК ДМ. Программное обеспечение написано автором диссертации в среде Matlab R2013a и использовалось при выполнении эскизного проекта детектора молний «Конвергенция» для МКС.

Порядок выполнения моделирования следующий [48]:

- 1) Определяются незашумлённые сигналы молнии и фона (в электронах) в зависимости от номеров строки и столбца пикселя (i, j) на изображении

$$U_{\text{исходн}}(i, j) = U_{\text{центр}} \cdot \left[1 - k_{\text{вин}} \cdot \frac{(i - 0,5 \cdot h)^2 + (j - 0,5 \cdot l)^2}{0,25 \cdot (h^2 + l^2)} \right] \quad (4.1)$$

где:

$U_{\text{исходн}}(i, j)$ – сигнал в пикселе с номером строки i и номером столбца j , электроны. Представляет собой сумму сигналов от фона и от молнии (если она попадает в данный пиксель);

$U_{\text{центр}}$ – сигнал в центральном пикселе кадра, электроны. Представляет собой сумму сигналов от фона и от молнии (если она попадает в центр кадра), вычисляется в энергетическом расчёте;

$k_{\text{вин}}$ – коэффициент виньетирования на краю поля зрения (в углу кадра);

i, j – номера строки и столбца рассматриваемого пикселя соответственно;

h, l – высота и длина изображения соответственно (в пикселях).

- 2) Имитируется влияние ФПМ системы. Метод моделирования аналогичен описанному в [50]. Также в моделировании ПАК ДМ необходимо учесть влияние возможной дефокусировки:

$$U = \left| F^{-1} \left(MTF_{\text{сист}}(\nu) \cdot F(U_{\text{исходн}}) \right) \right| \quad (4.2)$$

где:

$F(U)$ – двумерное дискретное преобразование Фурье снимка U ;

U – незашумлённый снимок, где учтено влияние ФПМ на размытие изображения;

$U_{\text{исходн}}$ – исходный неразмытый снимок, полученный после выполнения п.1;

$MTF_{\text{сист}}(\nu)$ – ФПМ системы. При пространственной частоте ν состоит из двух множителей: ФПМ оптики с учётом дефокусировки x и ФПМ фотоприёмника:

$$MTF_{\text{сист}}(\nu) = MTF_{\text{опт}}(\nu) \cdot MTF_{\text{фпу}}(\nu) = \left(1 - \frac{\nu}{\nu_{\text{гр}}(x, \frac{D}{f}, \lambda)}\right) \cdot MTF_{\text{фпу}}(\nu) \quad (4.3)$$

При этом ФПМ фотоприёмника обоснована в п. 2.4, а ФПМ объектива – в п. 2.7.

- 3) Сигнал зашумляется для каждого пикселя:

$$U_{\text{шум}}(i, j) = U_{\text{фон}}(i, j) + randn_1 \cdot \sqrt{U_{\text{фон}}(i, j)} + randn_2 \cdot N_{\text{фпу}} \quad (4.4)$$

Где $randn_1$ и $randn_2$ – случайные числа, распределённые нормально с СКО=1 и матожиданием 0.

- 4) Зашумлённые сигналы молнии и фона (в электронах) переводятся в уровни АЦП и округляются до неотрицательного целого числа, тем самым производится квантование сигнала:

$$U_{\text{кв}}(i, j) = \left[U_{\text{шум}}(i, j) \cdot \frac{2^n - 1}{C_{\text{зар}}} \right] \quad (4.5)$$

где:

$U_{\text{кв}}(i, j)$ – сигнал в пикселе, уровни АЦП;

$U_{\text{шум}}(i, j)$ – зашумлённый сигнал в пикселе, электроны;

$[x]$ – округление действительного числа x до целого неотрицательного числа;

n – разрядность АЦП, бит/пиксель;

$C_{\text{зар}}$ – зарядовая ёмкость пикселя фотоприёмника, электроны

Таким образом воспроизводится исходное изображения, получаемое ПАК ДМ.

- 5) Производится бинирование исходного изображения. Именно это изображение передаётся по кабелям из ОЭБ в блок обработки при работе в основном режиме. Для визуализации стадий обработки выполняется вычитание фона на бинированном изображении и обнуление всех пикселей, не превышающих порог.

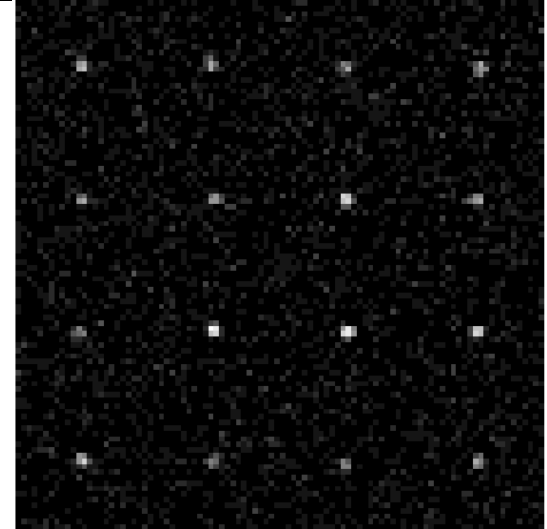
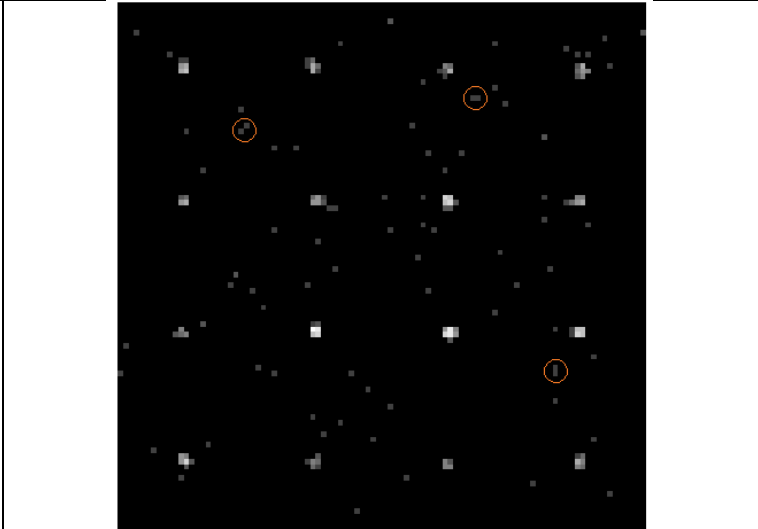
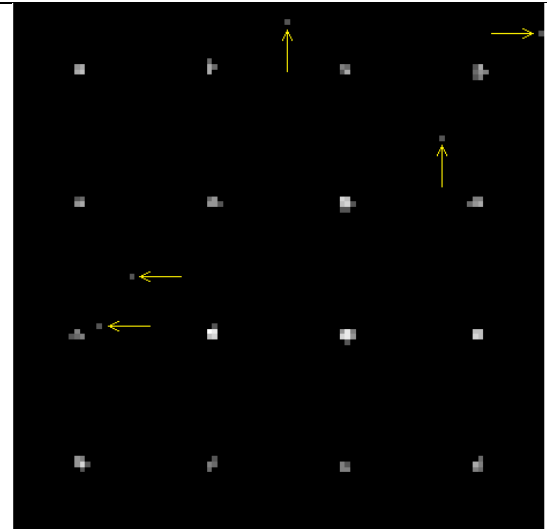
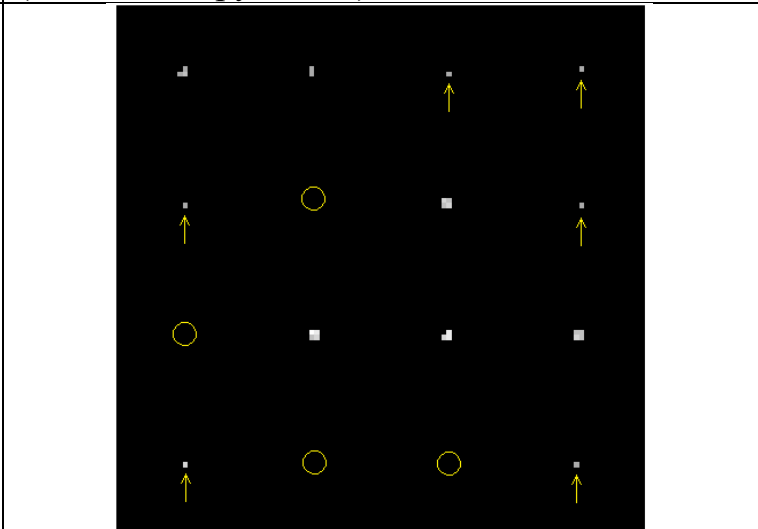
4.2. Экспериментальное определение необходимого порога в алгоритме

Определим экспериментально оптимальное значение порога для алгоритма обнаружения вспышек. Для этого была выполнена программная реализация алгоритма в среде Matlab. Исходными данными для алгоритма в описываемых компьютерных экспериментах являются синтезированные снимки.

Пусть яркость отблесков составляет $10 \text{ мкДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср})$. Впечатаем в каждый снимок 16 таких отблесков. При этом учтём временную фазу: расчётный сигнал домножим на случайное число, равномерно распределённое от 0,5 до 1. Таким образом, при достаточно большом количестве отблесков (не менее 10) воспроизводится эффект случайности временной фазы.

На рисунках в таблице 4.1. представлена визуализация выбора порога фильтрации при обработке снимка, на которой заранее наложены 16 отблесков с известными координатами.

Таблица 4.1. Визуализация обработки снимка, снятого ПАК ДМ, при разных значениях порога фильтрации.

	
<p>Бинированный снимок 96*96 пикселей после вычитания фона $Fon(i,j,N)$. На рисунке хорошо видны шумы, сохранившиеся после вычитания фонового сигнала от облаков.</p>	<p>Снимок после вычитания фона. Обнулены пиксели с разностным сигналом <3 ур. АЦП (отсечка по порогу 3 ур. АЦП). Из-за малой величины порога многие шумовые пиксели преодолели его. Есть 3 ложные вспышки (помечены кружками).</p>
	
<p>Снимок после вычитания фона. Обнулены пиксели с разностным сигналом <4 ур. АЦП. На снимке есть 5 шумовых пикселей, преодолевших порог (показаны стрелкой). Но ложных вспышек нет, так как все 5 шумовых пикселей одиночные (у такого пикселя нет соседей, преодолевших порог)</p>	<p>Снимок с вычтенным фоном. Обнулены пиксели с разностным сигналом <8 ур. АЦП. На снимке нет ложных молний. Но из-за большой величины порога некоторые истинные вспышки не распознаны. В 6 вспышках только 1 пиксель прошёл фильтрацию (показаны стрелками), а в 4 вспышках вообще нет таких пикселей, (показаны кружками). Для этого случая вероятность распознавания составляет не 1, а $(16-6-4)/16 = 0,375$</p>

Результаты компьютерных экспериментов с синтезированными изображениями показаны на рисунке 4.1.

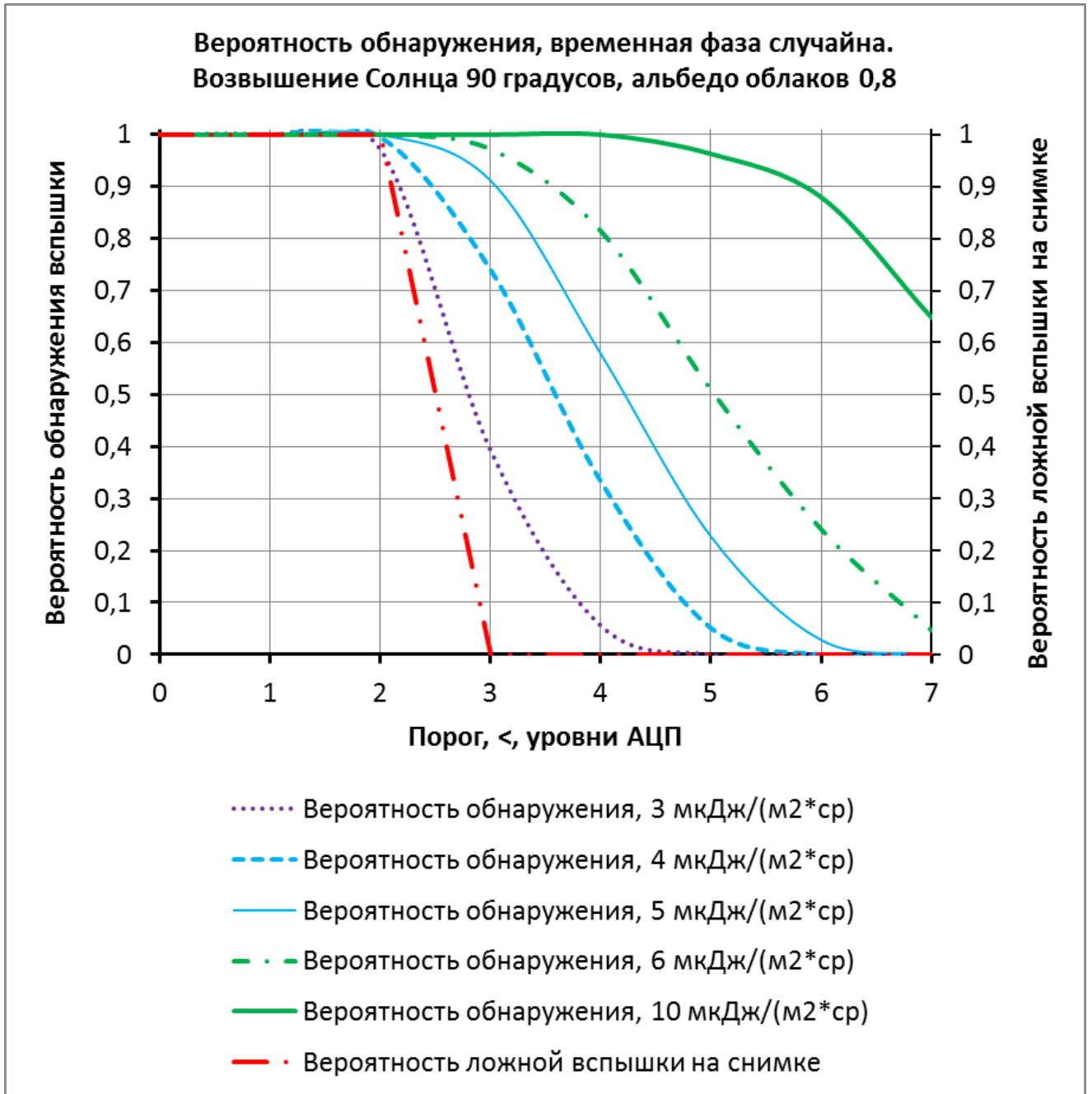


Рисунок 4.1. Зависимость вероятности обнаружения отблеска от порога фильтрации для разных значений яркости, полученная при обработке модельных снимков.

Перестроим полученные графики в другое семейство: зависимость вероятности обнаружения отблеска от его яркости при фиксированном пороге (рисунок 4.2).

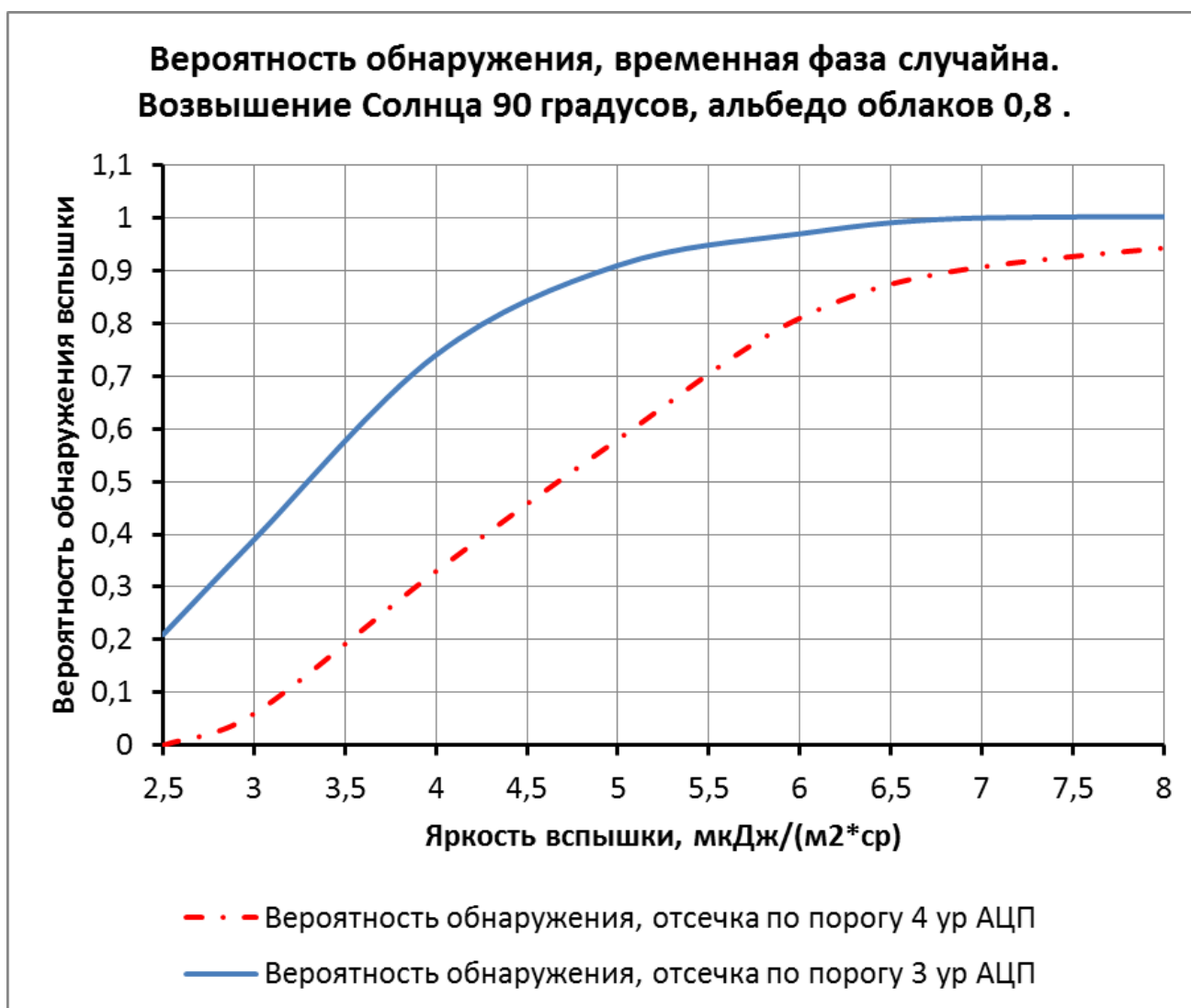
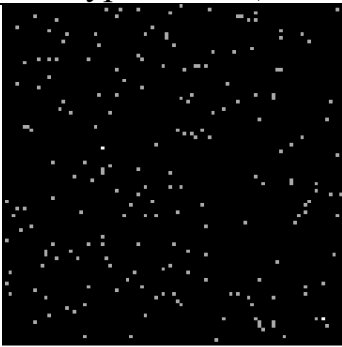
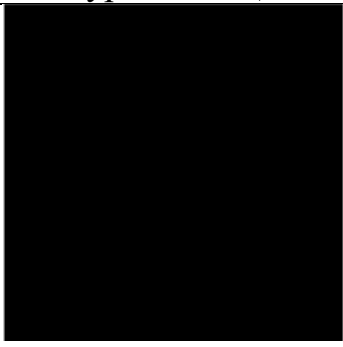
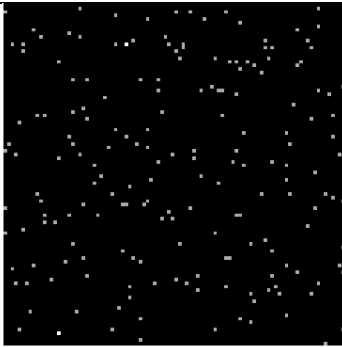
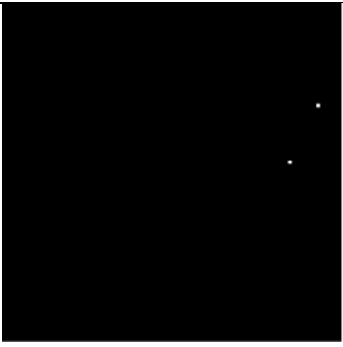
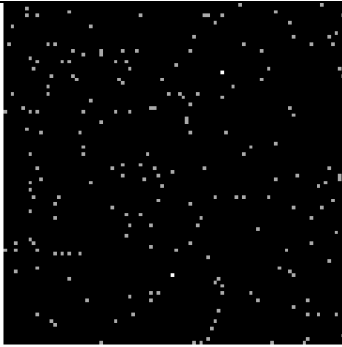
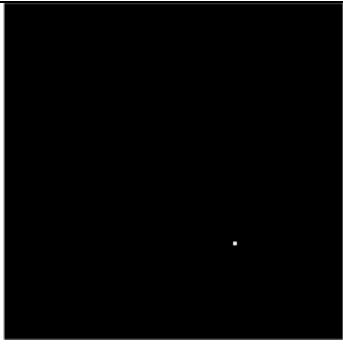
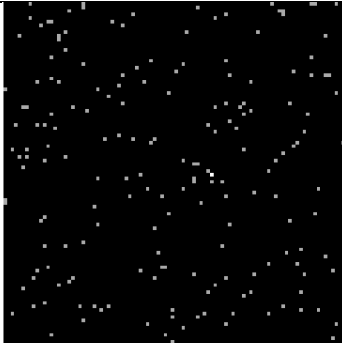
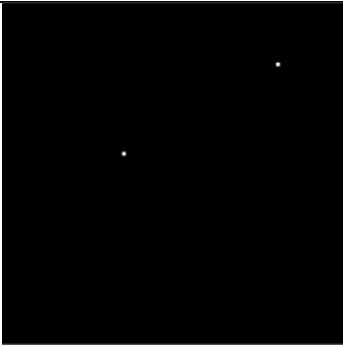
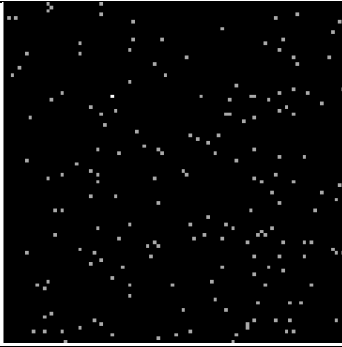
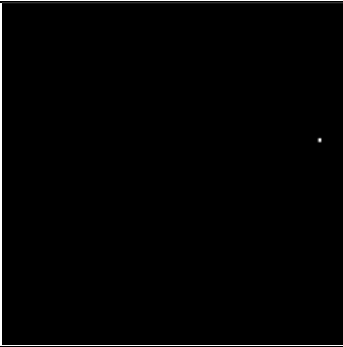


Рисунок 4.2. Зависимость вероятности обнаружения отблеска от его яркости для двух величин порога.

Также была экспериментально определена вероятность ложного срабатывания детектора от величины порога. В таблице 4.2. показана визуализация обработки пяти снимков без истинных молний с двумя вариантами отсечки: по порогу 2 и 3 уровня АЦП. Из таблицы 4.2 видно, что при отсечке по порогу 2 уровня АЦП на каждом снимке будут ложные молнии. При повышении порога до уровня 3 АЦП ложных вспышек на снимках нет.

Таблица 4.2. Примеры синтеза снимков для поиска ложных вспышек.

Номер снимка	Обработка с отсечкой по порогу 2 уровня АЦП	Обработка с отсечкой по порогу 3 уровня АЦП
1		
2		
3		
4		
5		

Проведём сравнение вероятностей обнаружения, полученных двумя способами: расчётным путём и при помощи обработки синтезированных снимков. На рисунке 4.3. показаны графики вероятности обнаружения для отблесков трёх различных яркостей.

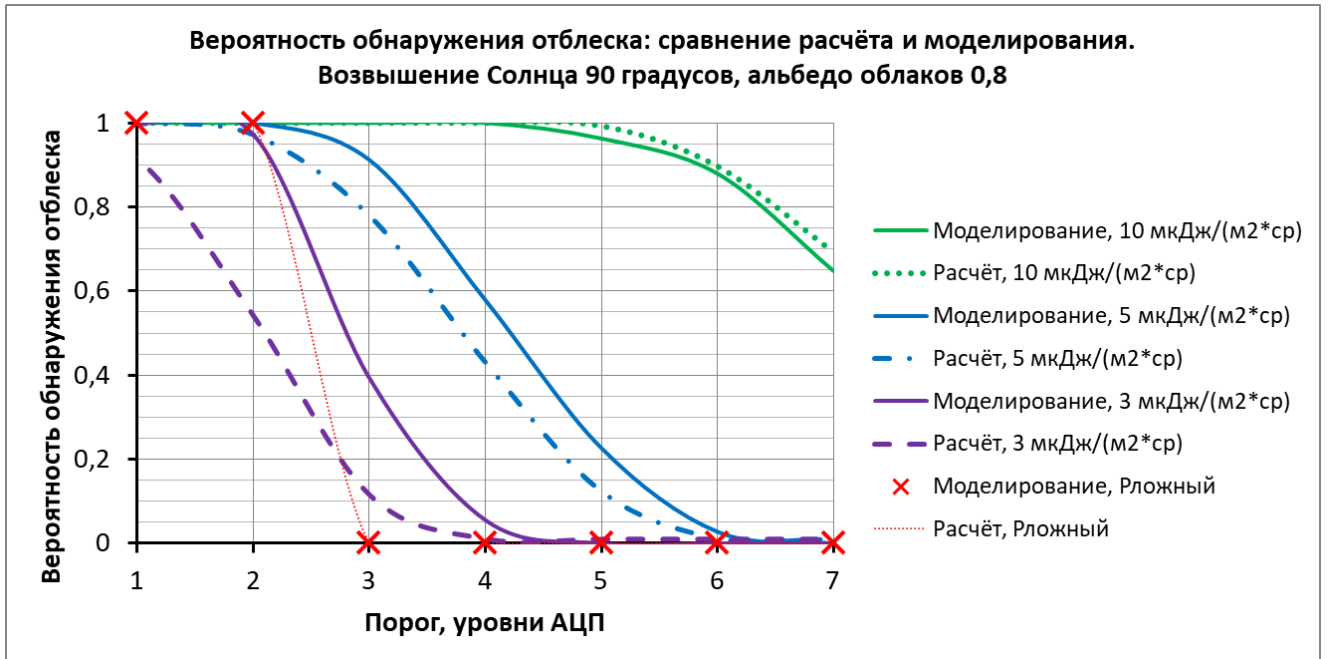


Рисунок 4.3. Сравнение результатов расчёта и моделирования при определении вероятности обнаружения отблеска с учётом случайности временной фазы свечения.

Из рисунка 4.3. видно, что при одинаковых яркостях отблеска для величин порога фильтрации 3...5 уровней АЦП относительное расхождение результатов не превысит 15% для наиболее типичных отблесков (яркость 5...10 мкДж/(м²*ср)). Расхождение кривых для отблеска малой яркости (3 мкДж/(м²*ср)) обусловлено влиянием погрешностей округления при оцифровке аналогового сигнала в АЦП.

4.3. Оценка требуемой производительности бортового вычислителя

Для проведения оценки воспользуемся определённым ранее пиковым потоком молний: 50 световых импульсов в секунду. На каждый выявленный отблеск нужно провести ~15 операций сравнения и ~5 операций умножения. Но учтём также, что обработка пикселей, не содержащих изображения отблесков,

также требует вычислительных ресурсов. Прежде всего это затраты на вычисление фактического фона (3 сложения на пиксель), расчётного фона (1 умножение) и сравнение с порогом (1 сравнение). Предположим, что сложность операций одинакова. Тогда за 1 секунду вычислитель должен выполнять:

$$N = 1000 \cdot 96^2 \cdot 5 + 50 \cdot (15 + 5) = 46 \cdot 10^6 \text{ операций/с} \quad (4.6)$$

Полученное значение позволяет сказать, что существующие процессоры с большим запасом способны обеспечить реализацию алгоритмического обеспечения ПАК ДМ. Для сравнения: производительность процессора смартфона может превышать 2 Гигафлопса [51].

4.4. Макетирование ПАК ДМ

4.4.1. Макетирование камеры

Целью макетирования является экспериментальная проверка корректности принципов моделирования снимков, алгоритмического обеспечения ПАК ДМ и результатов моделирования его работы [52].

При выполнении макетирования ПАК ДМ должны экспериментально определяться вероятности обнаружения вспышек в зависимости от их яркости и размера (при фиксированном сигнале фона). На основе сравнения полученных данных с результатами обработки модельных снимков можно сделать вывод о корректности разработанных принципов моделирования снимков (параграф 4.1).

4.4.2 Описание макета

Общий вид макета приведён на рисунке 4.4. Макет выполнен на базе клинового гиперспектрометра, принцип работы и результаты испытаний которого описаны в [53] и [54]. Гиперспектрометр содержит высокоскоростную КМОП-матрицу. В клиновом светофильтре длина волны зависит от номера столбца кадра. Таким образом, все имитационные вспышки должны быть в одном столбце, чтобы обеспечить свечение в одной и той же длине волны. Рабочая длина волны выбирается таким образом, чтобы яркости вспышки и фона имели нужное соотношение. На рисунке 4.5. показан вид кадра гиперспектрометра и принцип расположения модельных отблесков.

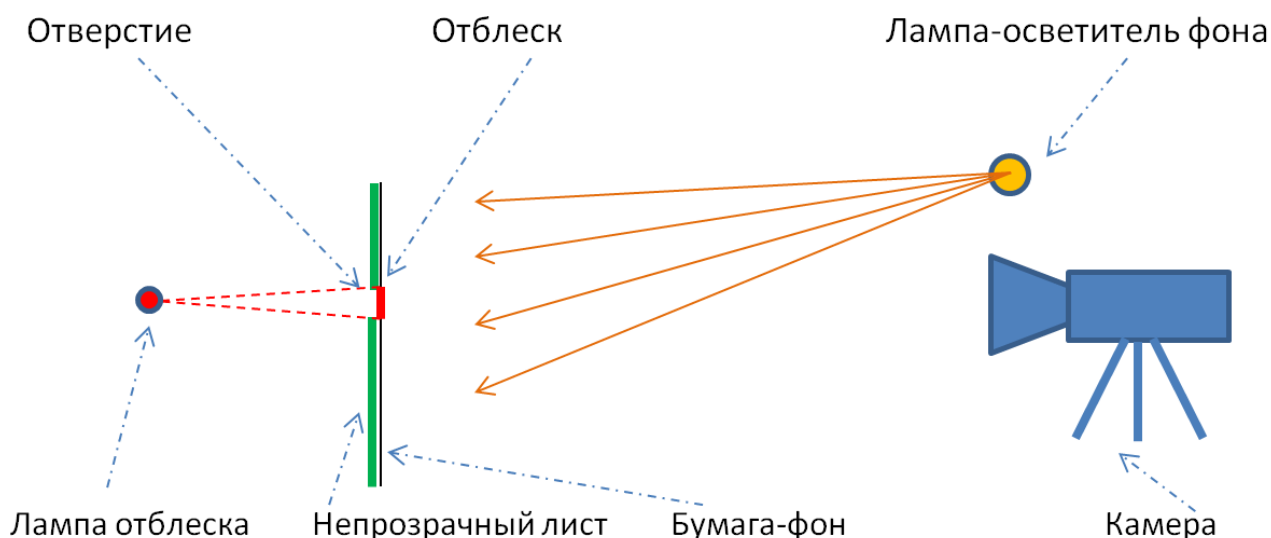


Рисунок 4.4.

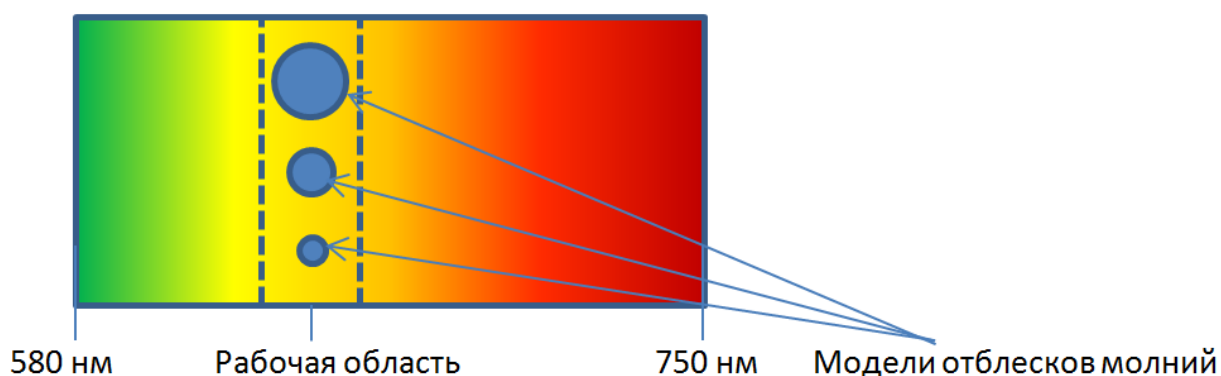


Рисунок 4.5.

Фоноцелевая обстановка воспроизводится белым непрозрачным экраном, освещаемым лампой накаливания. В экране делаются отверстия с диаметром, соответствующим угловому размеру отблеска молнии. Световой импульс молнии имитируется второй лампой накаливания, находящейся за экраном. Изменение яркости фона и вспышек осуществляется путём удаления/приближения ламп. Отверстия, как и экран, закрыты белой бумагой, обеспечивающей ламбертовские свойства сцены.

Так как макет детектора молний работает в узком спектральном диапазоне шириной 8...10 нм, различием спектров ламп и Солнца можно пренебречь. Для работы алгоритма обнаружения отблесков ключевое значение имеет не рабочий диапазон длин волн, а величины сигналов, накопленных в пикселях изображения. Таким образом, при настройке макета можно выбрать длину волны, отличную от 777,4 нм. При этом важно обеспечить нужные величины сигнала фона и

соотношения интегральных яркостей отблеск/фон. Именно фотонный шум, определяемый сигналом фона, вносит главный вклад в зашумлённость снимка, критичную при обнаружении отблесков. Сигналы и от фона, и от отблеска формируются лишь от света в узкой спектральной полосе, поэтому появляется возможность применить в качестве источников света классические лампы накаливания [52].

В экране было сделано 8 отверстий диаметром от 2 до 10 мм, как показано в таблице 4.3. При дальности наблюдения 4,5 м это соответствует диаметру изображений отблесков от 13 до 64 небинированных пикселей фотоприёмника. Таким образом, появляется возможность одновременной съёмки отблесков существенно разных размеров.

Таблица 4.3.

Номер отверстия при отсчёте снизу кадра	1	2	3	4	5	6	7	8
Диаметр отверстия, имитирующего отблеск мм	10	6	4,5	4	3,3	2,9	2,5	2
Диаметр изображения отблеска, небинированные пиксели	64	38	29	26	21	19	16	13
Диаметр изображения отблеска, бинированные пиксели	8	4,8	3,6	3,2	2,6	2,3	2	1,6

Для воспроизведения реальной фоноцелевой обстановки необходимо, чтобы сигналы от фона и молнии соответствовали моделируемым условиям съёмки. Например, для воспроизведения наихудших условий съёмки (возвышение Солнца 90 градусов) время накопления подбирается так, чтобы сигнал от фона составлял 67...73% от максимума (171...186 уровней АЦП).

В используемом гиперспектретре выходные снимки имеют разрядность 8 бит/пиксель, а в создаваемом приборе ПАК ДМ она составляет 10 бит/пиксель. Следовательно, необходимо обеспечить корректность сопоставления результатов обработки снимков, полученных двумя путями: моделированием на компьютере и непосредственной съёмкой макетной камерой. Для решения этой задачи выполнено дополнительное моделирование снимков, где условия съёмки (сигнал фона, разрядность информации) приведено в соответствие со снимками, полученными при макетировании.

Примеры получаемых снимков приведены на рисунках 4.6 – 4.9.

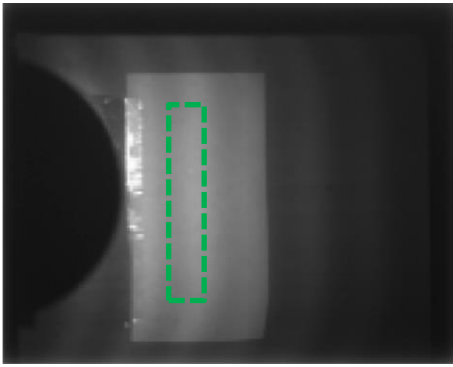


Рисунок 4.6. Снимок фона. Участок кадра, имитирующий область съёмки, показан прямоугольником. Размер прямоугольной области выбирается с учётом однородности светофильтра.

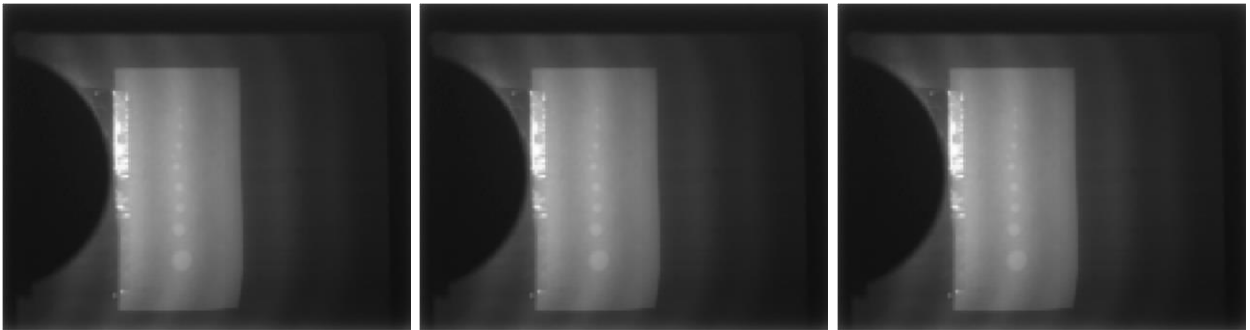


Рисунок 4.7. Серия снимков с отблесками



Рисунок 4.8. Серия снимков с отблесками после вычитания фона.

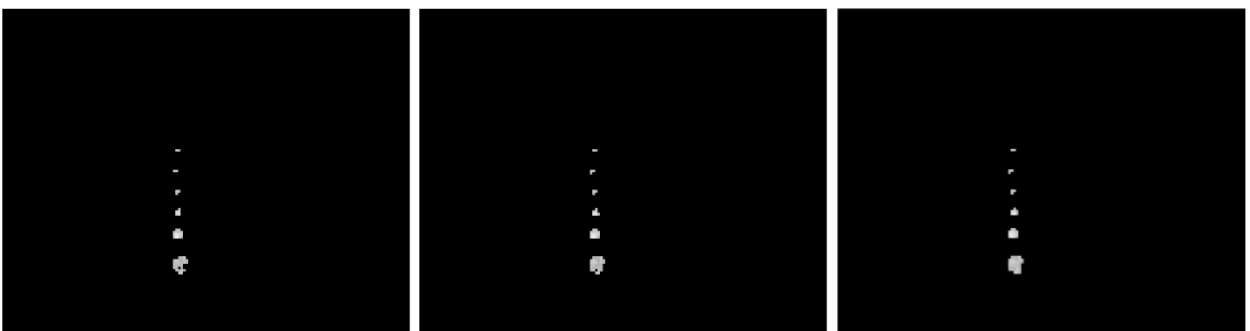


Рисунок 4.9. Серия снимков с отблесками после вычитания фона и фильтрации по порогу. По результатам анализа можно сказать, что обнаружены нижние 6 отблесков и не обнаружены 2 верхних отблеска (самого маленького диаметра).

4.4.3 Последовательность испытаний

Последовательность действий при испытаниях следующая:

- 1) Производится настройка ламп освещённости фона и отблеска, а также выбор времени экспозиции;
- 2) Производится съёмка экрана с отблесками;
- 3) Сохраняется темновой кадр;
- 4) Полученная серия снимков загружается в алгоритм обработки изображений;
- 5) Запускается алгоритм обработки снимков. Определяется вероятность обнаружения отблеска какого-либо фиксированного размера от сигнала фона, сигнала отблеска или ещё какого-либо параметра;
- 6) Снимки исследуются с помощью ПО Matlab в части определения сигнала фона, сигнала от отблесков (для их различных диаметров), значения темнового кадра и его шума;
- 7) Выполняется синтез снимков с параметрами, соответствующими п.б. на основе методики, описанной в разделе 4.1.;
- 8) Синтезированные снимки также загружаются в алгоритм обработки изображений для определения вероятности обнаружения вспышки какого-либо фиксированного размера от сигнала фона, сигнала отблеска или ещё какого-либо параметра;
- 9) Сравниваются результаты обработки двух серий снимков: снятых *макетом* (п.4) и *синтезированных изображений*, воспроизводящих такие же условия съёмки. Это позволяет оценить корректность методики синтеза изображений и, соответственно, результаты апробации алгоритма поиска отблесков, полученные на основе работы с модельными изображениями.

Рассмотрим пример. Пусть в заданных условиях фоноцелевой обстановки было сделано 20 снимков. При этом отблеск №1 (самый крупный) обнаружен на всех 20 снимках, отблеск №4 – на 9 снимках, а отблеск №7 – только на одном изображении. Следовательно, вероятности обнаружения отблесков с диаметрами

10; 4; 2,5 пикселей составят 100; 45 и 5% соответственно (при данных яркостях фона и вспышки).

4.4.4 Полученные результаты

В процессе проведения съёмок сигнал фона оставался неизменным (170 уровней АЦП), как и сигнал от отблесков (18 уровней АЦП). Соответственно, серия снимков позволяет построить зависимость вероятности обнаружения отблеска от его диаметра. Кроме того, было выполнено моделирование снимков с такими параметрами фоноцелевой обстановки. Аналогично была получена и исследована серия снимков для сигнала фона 160 уровней АЦП и сигнала молнии 11 уровней АЦП.

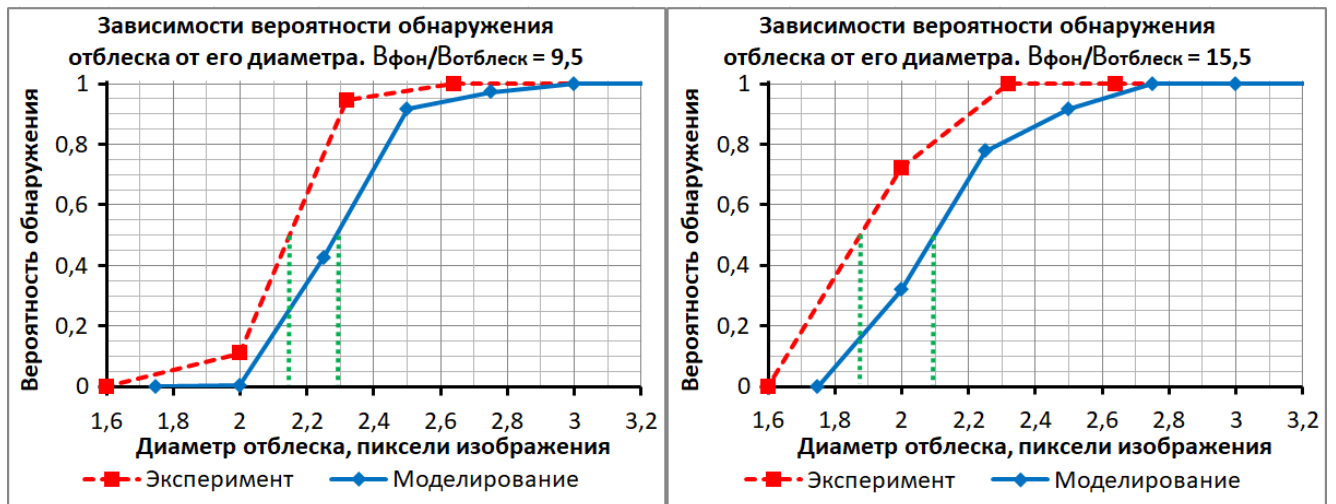


Рисунок 4.10. Зависимость вероятности обнаружения отблеска от его диаметра для двух соотношений яркостей фона и отблеска (9,5:1 и 15,5:1).

Основная характеристика для сравнения полученных данных — размер отблеска, обнаруживаемого с вероятностью 50 %. Анализ результатов позволяет сказать, что точность данных, полученных анализом синтезированных снимков, будет не хуже 15%: при $V_{\text{фона}}/V_{\text{мол}} = 15,5$ с вероятностью 0,5 обнаруживаются отблески с диаметром 1,85 и 2,15 пикселей соответственно для эксперимента и моделирования. Для вероятности обнаружения 70% размеры обнаруживаемых отблесков составляют 2 и 2,25 пикселей (расхождение моделирования и эксперимента 13%).

Выводы по Главе 4

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что способ моделирования снимков обеспечивает удовлетворительное совпадение результатов моделирования и эксперимента. Следовательно, подтверждена правильность результатов определения вероятности обнаружения путём анализа синтезированных снимков (параграфы 4.1-4.3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

- 1) Обоснована физическая модель молнии, ориентированная для применения как на низкоорбитальных пилотируемых (МКС) и автоматических КА, так и на геостационарных КА. Доказана целесообразность наблюдения вспышек в полосе свечения $777,4 \pm 0,2$ нм с частотой кадров 1000 Гц;
- 2) Определены направления развития низкоорбитальных детекторов: переход с ПЗС на КМОП-фотоприёмники, введение диапазона цифрового бинирования пикселей, реализация гибкости характеристик, гарантированная работа на дневной стороне витка;
- 3) В результате комплексного расчетно-теоретического исследования обоснованы ключевые характеристики ПАК ДМ: вероятность обнаружения отблеска, разрешающая способность, размер области обзора, число градаций яркости в изображении, частота кадров;
- 4) Впервые в отечественном приборостроении систем ДЗЗ сформирован облик оптического детектора молний с гибкими характеристиками на основе КМОП-фотоприёмника. При этом учтены возможности существующей производственной базы, коммерческая доступность фотоприёмников, задача минимизации массы и габаритов прибора;
- 5) Сформулированы критерии обнаружения отблесков молний, исключающие ложные тревоги, порождаемые искусственными источниками света и шумовыми сигналами. На основе критериев разработан алгоритм автоматической обработки изображений, получаемых ПАК ДМ.
- 6) Реализован способ моделирования снимков для различных условий съёмки. Результаты моделирования снимков и программного макетирования алгоритма подтвердили правильность аппаратных решений ПАК ДМ. Вероятность обнаружения характерного отблеска молнии оценивается не менее чем в 70% даже в наихудших условиях наблюдения. Таким образом, доказана

возможность круглосуточной работы ПАК ДМ во всех реальных условиях фоноцелевой обстановки;

- 7) Проведено макетирование ПАК ДМ, учитывающее особенности создаваемой системы. Согласованность результатов испытаний макета и моделирования снимков подтвердили правильность методического обеспечения;
- 8) Полученные результаты применены при выполнении эскизного проекта детектора молний для комплекса научной аппаратуры «Конвергенция», создаваемого для работы на МКС;
- 9) Дальнейшая разработка темы диссертационной работы даст возможность создания методического обеспечения наземных и лётных испытаний низкоорбитального детектора молний с гибкими характеристиками.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ

TGF	- Terrestrial gamma-ray flashes (гамма-вспышки земного происхождения)
TLE	- Transient luminous events (высотные вспышки молний)
АЦП	- Аналогово-цифровой преобразователь
ВГА	- Верхняя граница атмосферы
ГСО	- Геостационарная орбита
ГЭЦ	- Глобальная электрическая цепь
ДЗЗ	- Дистанционное зондирование Земли
КА	- Космический аппарат
КМОП	- Комплементарная структура «металл-окисел-полупроводник»
МКС	- Международная космическая станция
НОО	- Низкая околоземная орбита
ОСШ	- Отношение сигнал/шум
ОЭБ	- Оптико-электронный блок
ПАК ДМ	- Программно-аппаратный комплекс детектора молний космического базирования
ПЗС	- Прибор с зарядовой связью
ПО	- Программное обеспечение
СКО	- Среднеквадратичное отклонение
СФ	- Светофильтр
ТВП	- Таблица временных поправок
ФПМ	- Функция передачи модуляции

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Finke U., Kreyer O. Detect and locate lightning events from geostationary satellite observations // Institut für Meteorologie und Klimatologie. Universität Hannover, 2002.
- [2] Naccarato Kleber P., Dos Santos Walter A., Moura C., Carretero M., Tikami A. Total Lightning Flash Detection from Space: A CubeSat Approach [Electronic resource] // 24th International Lightning Detection Conference & 6th International Lightning Meteorology Conference, San Diego, California, USA, 2016.
URL:
https://www.researchgate.net/publication/304675330_Total_Lightning_Flash_Detection_from_Space_A_CubeSat_Approach (дата обращения 27.08.2020)
- [3] Zhang W., Zhang Y., Zheng D., et al. Relationship between lightning activity and tropical cyclone intensity over the northwest Pacific // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2015, vol. 120, iss. 9, pp. 4072–4089. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014JD022334>
- [4] Westcott N. Summertime cloud-to-ground lightning activity around major Midwestern urban areas // *Appl. Meteorol.*, 1995, № 34, p. 1633–1642.
- [5] Sharkov E.A., Kuzmin A.V., Vedenkin N.N., Jeong S., Ermakov D.M., Kvitka V.E., Kozlova T.O., Komarova N. Yu., Minaev P. Yu., Park Il. H., Pashinov E.V., Pozanenko A.S., Prasolov V.O., Sadovskii I.N., Sazonov D.S., Sterlyadkin V.V., Khapin Yu. B., Hong G., Chernenko A.M. Convergence Space Experiment: Scientific Objectives, Onboard Equipment, and Methods of Solving Inverse Problems. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2019, Vol. 55, No. 9, pp. 1437–1456.
- [6] Жидков А.А., Калинин А.В. Некоторые вопросы математического и численного моделирования глобальной электрической цепи в атмосфере // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*, 2009, № 6(1), стр. 150-158.

- [7] Слюняев Н.Н. Теоретическое исследование структуры и динамики глобальной электрической цепи: диссертация на соискание учёной степени к. ф.-м. н: 25.00.29 / Слюняев Николай Николаевич - Нижний Новгород, 2016. -157 с.
- [8] Морозов В.Н. Влияние молниевых разрядов грозовых облаков на глобальную электрическую цепь // Глобальная электрическая цепь. Материалы Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль, 2013. – 136 с. Стр. 15
- [9] Слюняев Н.Н., Мареев Е.А., Калинин А.В., Жидков А.А. Оценка изменения ионосферного потенциала вследствие крупномасштабных возмущений проводимости в атмосфере // Глобальная электрическая цепь. Материалы Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» – филиал Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта – Ярославль, 2013. – 136 с. Стр. 17
- [10] Nag A., Murphy M., Shulz W., Cummins K. Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques // Earth and space sciences, 2015, № 2.
- [11] Черненко А.М. О связи гамма-вспышек земного происхождения (TGF) с распределением примесей в тропосфере [Электронный ресурс] // Тез. 15-й Всеросс. открыт. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2017. URL: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=144&thesis=6297> (дата обращения: 15.12.2019).
- [12] Романов А.А, Тюлин А.Е. Шестой технологический уклад в космическом приборостроении // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, № 4, стр. 64-82.

- [13] Гектин Ю.М. Перспективные оптические системы космических систем ДЗЗ на базе МКА // Цифровая трансформация космического приборостроения / Под редакцией А.А. Романова, А.А. Романова, Ю.М. Урличича. Королёв: АО «ЦНИИмаш», 2019. – 397 с. Стр. 227-239.
- [14] Christian H.J. and Goodman, S.J., “Optical observations of lightning from a high altitude airplane”, *Journal of Atmos. Oceanic Technol.*, 1987, Vol. 4, pp 701 –711
- [15] Goodman S.J, Christian H.J. A Comparison of the Optical Pulse Characteristics of Intracloud and Cloud-to-Ground Lightning as Observed above Clouds // *Journal of Applied Meteorology*. 1988, vol. 27, № 12, p. 1369–1381.
- [16] Dobber M., Grandell J. Meteosat Third Generation (MTG) Light Imager (LI) instrument performance and calibration for user perspective [Electronic resource] // EUMETSAT, 2014. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1088&context=calcon> (дата обращения: 15.12.2019).
- [17] Biron D. Meteosat third generation lightning imager [Electronic resource]// Conference «5’ EUMETEOSAT-LIST». Roma, Italy, 26-27.05.2011. URL: https://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjGxq6wyL7rAhUol4sKHUmxCeUQFjAAegQIARAB&url=http%3A%2F%2Fwww.asdc.asi.it%2F10thagilemeeting%2Fdw1.php%3Ffile%3Dworkshop_files%2F4.Biron_AGILE_10th_WS.pdf&usq=AOvVaw1ojNS221JrS2girZicDaLc (дата обращения 28.08.2020)
- [18] Goodman S. Geostationary Lightning Mapper for GOES-R and Beyond [Electronic resource] // Conference «STAR science forum», 11.04.2008. URL: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/star/documents/seminardocs/2008/Goodman20080411.pdf> (Дата обращения 27.08.2020)

- [19] Biron D., Laquale P., De Leonibus L. Simulation of Meteosat Third Generation – Lightning Imager through Tropical Rainfall Measuring Mission – Lightning Imaging Sensor data [Electronic resource] // Conference «Optical engineering+applications», San Diego, 2008.
URL: https://www.researchgate.net/publication/237359366_Simulation_of_Meteo_sat_Third_Generation_-_Lightning_Imager_through_Tropical_Rainfall_Measuring_Mission_-_Lightning_Imaging_Sensor_data (дата обращения 27.08.2020)
- [20] Blakeslee R. J., Christian H. J., Stewart M. F., Mach D. M., Bateman M., Walker T. D., Buechler D., Koshak W. J., O'Brien S., Wilson T., Colley E. C., Abbott T., Carter J., Pavelitz S., Coker C. Lightning Imaging Sensor (LIS) for the International Space Station (ISS): Mission Description and Science Goals [Electronic resource] // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A.
URL: <https://strives-uploads-prod.s3.us-gov-west-1.amazonaws.com/20140011702/20140011702.pdf?AWSAccessKeyId=AKIASEVSKC45ZTTM42XZ&Expires=1598718753&Signature=G2ySVP%2FL1%2BQt46QkeN0uNgCvdAk%3D> (Дата обращения 29.08.2020)
- [21] Mach D.M., Christian H.J., Blakeslee R.J., et al. Performance assessment of the Optical Transient Detector and Lightning Imaging Sensor. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2007, vol. 112, iss. D9. DOI: <https://doi.org/10.1029/2006JD007787> .
- [22] Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. - 234 с.
- [23] Christian H.J., Blakeslee R.J., Voccippio D.J., et al. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. // *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2003, vol. 108, no. D1, pp. 4-1–4-15.
DOI: <https://doi.org/10.1029/2002JD002347>

- [24] Suszcynsky D.M, Light T.E, Davis S., Green J.L., Gullien J.L., Myre W. Coordinated observations of optical lightning from space using the FORTE photodiode detector and CCD imager // Journal of geophysical research, 2001, т. 106, № D16, pp. 17897-17906.
- [25] Davis S.M., Suszcynsky D.M., Light T.L. FORTE observations of optical emissions from lightning: Optical properties and discrimination capability // Journal of geophysical research, 2002, т. 107, № 21.
- [26] Le Mer-Dachard F., Cansot E., Hebert P. Design and performances of MicroCameras and Photometers instruments on TARANIS satellite for an advanced characterization of Transient Luminous Event in the upper atmosphere // Proc. SPIE 9640, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XX, 964007 (16 October 2015); doi: 10.1117/12.2194992
- [27] Зелёный Л.М, Гуревич А.В., Климов С.И., Ангаров В.И., Батанов О.В. и др. Академический микроспутник "Чибиc-М" // Космические исследования, 2014. т. 52, № 1, стр. 1-13.
- [28] Зелёный Л.М, Гуревич А.В., Климов С.И., Ангаров В.И., Назаров В.Н, Родин В.Г. и др. «Проект микроспутник «Чибиc-М». Опыт создания и реализации» // Механика и процессы управления, 2015, т. 7, № 4 (57), стр. 91-118.
- [29] Бондаренко А.В., Докучаев И.В., Котцов В.А. Результаты работы цифровой камеры миссии «ЧИБИC-М» [Электронный ресурс] // Тезисы конференции "Техническое зрение в системах управления-2015", Москва, 2015.
URL: http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ТЗСУ_2015.pdf
(Дата обращения 30.08.2020)
- [30] Chanrion O, Neubert T. The Modular Multispectral Imaging Array (MMIA) of the ASIM Payload on the International Space Station // 2019, Space Sci Rev, т. 215, № 28.

- [31] Østgaard N., Neubert T., Reglero V., Ullaland K., Yang S., Genov G.
First 10 months of TGF observations by ASIM // Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, т. 124, № 24, pp. 14024-14036.
- [32] Zhiqing Z, Qiang G. FY-4A satellite commissioning latest outcome [Electronic resource] // Conference "2018 GSICS Data & Research Working Groups Annual Meeting", 2018.
URL: http://gsics.atmos.umd.edu/pub/Development/20180319/1f_FY-4A%20satellite%20commissioning%20latest%20outcome.pdf
(Дата обращения 27.08.2020)
- [33] Christian H.J, Blakeslee R.J., Goodman S.J, Mach D.A., Stewart M.F., Buechler D.E., Koshak W.J., Hall J.M., Boeck W.J., Driscoll K.T., Voccippio D.J.
The lightning imaging sensor [Electronic resource]
URL: https://www.academia.edu/22402745/The_lightning_imaging_sensor
(Дата обращения 27.08.2020)
- [34] Квитка В.Е., Корх А.В. Создание детектора молний для Международной космической станции // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета, 2018, т. 66, № 1, pp. 42-49.
- [35] Goodman S.J., Blakeslee R.J., Koshak W.J., Mach D., Bailey J., Buecher D., Carey L., Shultz C., Bateman M., McCaul E., Stano G. The GOES-R Geostationary Lightning Mapper (GLM) // Atmospheric Research, 2013, vol. 125-126, pp. 34-49
- [36] CYIL1SM1300AA LUPA-1300 1.3 MPxl High Speed CMOS Image Sensor [Electronic resource] // URL: https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Cypress%20PDFs/lupa_1300_8.pdf
(Дата обращения: 22.08.2020).
- [37] NOIL2SM1300A LUPA1300-2: High Speed CMOS Image Sensor [Electronic resource] URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NOIL2SM1300A-D.PDF>
(Дата обращения: 22.08.2020).

- [38] NOIL1SN3000A LUPA3000: 3 MegaPixel High Speed CMOS Sensor
[Electronic resource]
URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NOIL1SN3000A-D.PDF>
(Дата обращения: 22.08.2020).
- [39] MT9M413 [Electronic resource]
URL:
<https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/APTINA%20PDFs/MT9M413.pdf>
(Дата обращения: 22.08.2020).
- [40] GSense2011 [Electronic resource]. URL: <https://www.gpixel.com/products/area-scan-en/gsense2011e/> (Дата обращения: 22.08.2020).
- [41] GSENSE2011s 6.5µm, 2MP Scientific CMOS Image Sensor Datasheet V1.0 // GPixel inc. Release 06.01.2016.
- [42] Boreman G.D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems // Bellingham, Washington: SPIE press, 2001.
- [43] Lloyd J.M. Системы тепловидения - Москва: Мир, 1978. - 414 с.
- [44] Hopkins H.H. The Frequency Response of a Defocused Optical System // Proc. Roy. Soc., № 231, pp. 91-103, 1955.
- [45] Levi L., Austing R.H. Tables of the Modulation Transfer Function of a Defocused Perfect Lens // Appl. Opt., 1967, № 6, pp. 1513-1517.
- [46] Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы её расчёта - Москва: Физматлит, 1995. - 333 с.
- [47] Стальнов А.М., Хватов А.В., Жевако В.В., Разживалов П.Н. Особенности конструкции пылезащиты панхроматического блока ОЭП для аппаратуры «ПИКСЕЛ-ВД» // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XIII научно-технической конференции. – Калуга: Манускрипт, 2016. – 380 с.

- [48] Квитка В.Е., Корх А.В., Ключников М.В., Прасолов В.О. Алгоритм обработки данных детектора молний // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. Материалы XV научно-технической конференции. - М., 2018. - 368 с.
- [49] Burgesser R., Nicora M., Avila E. Characterization of the lightning activity of "Relampago del Catatumbo" [Electronic resource] // Journal of Atmospheric and Solar-terrestrial physics, 2012.
URL: <https://www.wvlln.net/publications/avila.Catatumbo2012.pdf>
(Дата обращения 27.08.2020)
- [50] Квитка В.Е., Блинов В.Д. Обработка изображений на борту КА ДЗЗ методом инверсной фильтрации // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, № 1, стр. 39-47.
- [51] Сравнение производительности современных смартфонов и компьютеров [Электронный ресурс]
URL: https://www.iguides.ru/main/other/sravnenie_proizvoditelnosti_sovremennykh_smartfonov_i_kompyuterov/
(Дата обращения: 22.08.2020).
- [52] Квитка В.Е. Моделирование и макетирование космического детектора молний // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2020, № 3 (132), с. 4–17. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2020-3-4-17>
- [53] Квитка В.Е., Ключников М.В., Князев А.Н., Алаторцев В.Л., Гуцин Д.М. Разработка и исследование макетного гиперспектрометра ОЭА-ГС // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: материалы XII научно-технической конференции (г. Сочи, 21-27 сентября 2015 г.). – Калуга: Манускрипт, 2015. – 436 с.
- [54] Квитка В.Е., Ключников М.В., Князев А.Н., Алаторцев В.Л., Гуцин Д.М. Исследование макетного гиперспектрометра на основе «клинового» светофильтра // Контенант, 2015, т. 14, № 4, стр. 31-35