

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Новосибирский  
государственный технический университет»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова  
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



**Голицын Андрей Вячеславович**

**ПРИБОР НАБЛЮДЕНИЯ С ЛАЗЕРНЫМ ЛОКАЦИОННЫМ  
И ТЕПЛОВИЗИОННЫМ КАНАЛАМИ**

Диссертация на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Специальность 2.2.6 – Оптические  
и оптико-электронные приборы и комплексы

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук,  
профессор  
Дмитриев Александр Капитонович

Новосибирск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1 ОБЗОР СО ВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РУЧНЫХ И	
ПЕРЕНОСНЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ .....	
1.1 Многоканальные ручные и переносные приборы наблюдения.....	15
1.2 Тепловизионные каналы многоканальных оптико-электронных приборов.....	26
1.3 Лазерные локационные каналы и приборы .....	28
1.4 Основные выводы по результатам первой главы.....	33
ГЛАВА 2 СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО	
ПОЛЯ И СОГЛАСОВАНИЕ МАСШТАБОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ КАНАЛОВ	
ПЕРЕНОСНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ .....	
2.1 Организация единого информационного поля.....	36
2.2 Картинка в картинке (PiP) .....	38
2.3 Выравнивание фокусных расстояний приемных объективов .....	39
2.4 Выравнивание полей зрения каналов .....	40
2.5 Выравнивание элементарных полей каналов .....	41
2.6 Выравнивание кратных элементарных полей .....	43
ГЛАВА 3 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО МАСШТАБА	
ИЗОБРАЖЕНИЙ КАНАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ,	
ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТИКО-	
ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ.....	
3.1 Проблема анизотропии лазерного локационного канала.....	50
3.2 Регулировка увеличения проекционной системы.....	51
3.3 Проблема дисторсии объективов.....	52
3.4 Выравнивание осей каналов и проблема параллакса каналов.....	53
3.5 Результаты расчета объектива телевизионного канала.....	55
3.6 Результаты расчета проекционной системы.....	56
3.7 Наложение изображений в процессоре .....	58

ГЛАВА 4 МЕТОД РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВА СУПЕРАПОХРОМАТА ЛАЗЕРНОГО ЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА .....	63
ГЛАВА 5 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА .....	73
5.1 Способы повышения эффективности лазерных локационных каналов .....	75
5.2 Описание конструкции лазерного локационного канала .....	80
5.3 Расчетная оценка дальности действия лазерного локационного канала .....	86
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	101
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты об использовании результатов диссертационной работы .....	111

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность темы исследования

В военной технике, задача раннего обнаружения противника и получения представления об обстановке является приоритетной. Кто раньше увидел, кто осознал обстановку, уже наполовину победил. Развитие средств наблюдения и прицеливания существенно опережает в темпах роста и стоимости, развитие средств поражения, достигая на сегодняшний день до половины стоимости боевой наземной машины или экипировки бойца.

С появлением оптико-электронных средств видения в различных спектральных диапазонах и на различных физических принципах появились и комплексы наблюдения, комбинирующие эти средства, сначала в виде отдельных приборов, а затем и в виде каналов, различного уровня интеграции.

Традиционно, сложная, тяжелая и дорогая аппаратура появляется сначала на флоте, затем на летательных аппаратах, по мере развития и снижения стоимости на бронетехнике и, в конечном счете, в руках бойцов. В последнее десятилетие развитие технологий предоставило техническую возможность реализации многоканальных оптико-электронных приборов (МОЭП), пригодных по габаритам, массе и энергопотреблению для использования пешими подразделениями.

Объединение и одновременное использование нескольких разноспектральных каналов позволяет с большей вероятностью и достоверностью обнаруживать и распознавать цели различного характера, в том числе тщательно замаскированные и закамуфлированные. Однако, в силу необходимости удовлетворения целому ряду противоречивых требований, среди которых полярными являются массогабаритные параметры и дальность видения, в каналах МОЭП обычно не реализуются предельные параметры, достижимые в одноканальных приборах. Так, любая комбинация двух каналов в одном МОЭП имеет следствием увеличение его массогабаритных характеристик по сравнению с обычным одноканальным вариантом. С другой стороны, при создании ручных



МОЭП с массой одноканального прибора, добавление второго канала неизбежно приводит к уменьшению апертур и фокусных расстояний объективов, что влечет за собой снижение дальности наблюдения в каждом отдельном канале. Таким образом, встает проблема оптимизации состава каналов и их характеристик, обеспечивающих превосходство поисковых характеристик и дальности действия МОЭП по сравнению с одноканальным прибором при равных массогабаритных характеристиках и энергопотреблении.

Второй проблемой современных МОЭП (и не только ручного класса) является сложность интеграции изображений нескольких визирных каналов в едином информационном поле.

Совмещение разноспектральных изображений в многоканальных оптико-электронных системах дает единую, быстро воспринимаемую картину наблюдаемого пространства. Однако, создание многоканальных систем наблюдения с совмещенным изображением каналов и цифро-алфавитной информации в едином информационном поле связано с серьезными проблемами обусловленными различными форматами и размерами, фотоприемников, взаимными помехами изображений каналов, потерей разрешения при совмещении разнородных дискретных растров, технологическими и эксплуатационными отклонениями оптических компонентов каналов.

В ручном приборе возникают дополнительные трудности – совмещение должно производиться в реальном масштабе времени, не должно быть затратным по вычислительным ресурсам (неизбежно связанным с весом и энергопотреблением), а результат должен выводиться на малоформатный дисплей, что исключает возможность некратного электронного масштабирования каналов без потери пространственного разрешения.

Способам совмещения разнородных изображений, получаемых из различных источников, посвящена обширная литература, в частности [1–14]. Достаточно хорошо проработаны вопросы согласования положения, масштабирования и поворота изображений различных каналов, но, при неограниченных временных и вычислительных ресурсах. В представленной

работе прорабатывается вопрос совмещения изображений оптимальный для малогабаритных приборов с ограниченным энергопотреблением.

Определенную проблему (на момент разработки МОЭП) представлял выбор физического принципа действия тепловизионного канала. Проблема возникает вследствие наличия выбора среди криогенных фотоприемников в спектральных диапазонах 8–14 мкм и 3–5 мкм, фотоприемников диапазона 3–5 мкм, охлаждаемых за счет многокаскадных термоэлектрических холодильников и неохлаждаемых микроболометрических фотоприемников. Более высокие характеристики чувствительности криогенных приемников оплачиваются значительной массой и энергопотреблением. Вопрос, какой фотоприемник обеспечивает минимальную массу МОЭП, при достижении требуемой дальности видения, является непростым и зависит от требуемой дальности наблюдения.

Специфика ручных МОЭП заключается в том, что, при относительно низкой стоимости, они являются наиболее технически и конструктивно сложными, поскольку реализация прибора без жесткого ограничения его массогабаритных характеристик и стоимости является более легкой задачей.

### **Степень разработанности темы исследования**

Многоканальные бортовые системы разрабатываются уже тридцать лет и вполне естественно, что за такое время накопились определенные решения, подходы, публикации, многие из которых уже успели даже устареть. Имеется довольно обширная литература [1–12] по многоканальным системам наблюдения и прицеливания, свойствам и преимуществам различных каналов и методам их комбинаций. В отечественной литературе введена классификация многоканальных приборов по глубине интеграции каналов: комплексированные, комбинированные и интегрированные.

Многоканальные ручные приборы являются серьезным вызовом для разработчиков. Бортовые системы могут не быть совершенными или удобными и при этом оставаться на своем борту, штатной принадлежностью которого они обречены оставаться. Ручной прибор всегда конкурирует с запасом питания или

патронов соответствующего веса. Неудобный или не слишком полезный прибор просто будет оставлен на складе. И сами ручные приборы весьма критичны по отношению к составу каналов, применяемым материалам, схемотехнике, технологиям корпусирования, системам питания. Именно поэтому появившийся опыт создания ручных МОЭП позволяют критически взглянуть на многие проблемы, волновавшие авторов публикаций и разработчиков бортовых многоканальных приборов, – способы совмещения входных зрачков, совместного использования оптических деталей, совмещения оптических осей и т.п., которым посвящена значительная часть отечественных книг и публикаций.

Среди до сих пор не решенных реальных проблем ручных МОЭП соискатель видит, в частности, следующие:

- интеграция изображения в едином масштабе на экране единого микродисплея;
- создание лазерного локационного канала с приемлемыми характеристиками дальности и скорости обнаружения, а также энергопотребления;
- несоответствие спектрального диапазона объективов и фотоприемников пассивных и активных ТВ каналов видимого и ближнего ИК диапазона спектра.

**Целью работы** является повышение дальности и скорости обнаружения целей, а также полноты представления обстановки оператору ручного многоканального оптико-электронного прибора.

Для достижения поставленной цели были поставлены **следующие задачи**:

1. Разработать метод согласования масштаба изображений каналов, различающихся по формату и размерам фотоприемных матриц, спектральным диапазонам и физическим принципам действия.

2. Разработать метод совмещения согласованных по масштабу изображений в едином информационном поле МОЭП.

3. Определить необходимую глубину интеграции каналов по электронике, входной оптике, процессорам изображений, устройствам отображения и изображению.

4. Разработать методы повышения скорости обзора и дальности действия лазерного локационного канала.

5. Разработать оптические схемы ТПВ и ЛЛ каналов, позволяющие реализовать согласование масштабов изображений каналов и повысить поисковые характеристики ручного МОЭП.

6. Разработать и изготовить макет МОЭП с ТПВ и ЛЛ каналами, демонстрирующий работоспособность методов совмещения изображений и повышения характеристик каналов.

### **Научная новизна:**

1. Предложен и экспериментально реализован метод совмещения изображений каналов многоканального оптико-электронного прибора в едином масштабе в едином информационном поле.

2. Предложены и экспериментально исследованы методы обеспечения единого увеличения каналов по всему полю изображения.

3. Предложена модификация метода расчета широкоспектрального объектива-суперапохромата видимого и ближнего ИК диапазона с высоким относительным отверстием 1:2 для лазерного локационного канала.

4. Предложены, теоретически обоснованы и экспериментально продемонстрированы методы повышения скорости обзора и дальности действия лазерного локационного канала.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Согласование угловых полей элементов (или групп элементов) фотоприемных матриц каналов оптико-электронного прибора по вертикали за счет выбора фокусных расстояний приемных объективов, с учетом проекционной системы лазерного локационного канала, обеспечивает единый масштаб изображения каналов, в единой быстро воспринимаемой сцене.

2. Ограничение дисторсии оптических систем каналов на этапе расчета, введение подрегулировки увеличения в проекционную систему лазерного локационного канала и субпиксельного электронного увеличения

тепловизионного канала по горизонтали во fusion-процессоре, обеспечивают единый масштаб изображения каналов по всему полю изображения.

3. Модификация метода расчета объектива-суперапохромата лазерного локационного канала обеспечила расчетное исправление хроматизма положения на четырех длинах волн, при высоком относительном отверстии 1:2, полном использовании спектрального диапазона ЭОПа поколения 2+ (0,43–0,88 мкм) и максимальной дальности обнаружения цели.

4. Автоматическое сканирование пространства по дальности, в задаваемых оператором границах, модуляция подсветки и распределение средней мощности фары пропорционально четвертой степени дистанции, повышают скорость поиска и дальность обнаружения цели.

### **Методология и методы исследования**

Работа включает информационно-аналитические исследования, расчетно-теоретические работы по проектированию МОЭП, каналов МОЭП и оптических систем, экспериментальные исследования МОЭП, каналов и отдельных узлов.

Теоретические расчеты общего характера, включая расчеты дальности действия каналов МОЭП и габаритные расчеты оптических систем, выполнены в математическом пакете MathCAD. Для поиска комбинаций стекол, пригодных для ахроматизации на четырех длинах волн, использовался язык программирования Python. Абберрационные расчеты оптических систем выполнены в программе оптических расчетов Zemax.

Экспериментальные лабораторные и полевые исследования проведены на базе экспериментальных и опытных образцов, разработанных группой специалистов Филиала ИФП СО РАН "КТИПМ", под руководством соискателя, в ходе ряда НИОКР.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Предложенный метод совмещения изображений каналов многоканального оптико-электронного прибора в едином масштабе в едином информационном поле использован в двухканальном псевдобинокулярном приборе наблюдения

разработки Филиала ИФП "КТИПМ". Метод обеспечивает одновременный обзор изображений двух каналов с принципиально разными сигнатурами цели, что кардинально повышает поисковые характеристики прибора при равных массогабаритных характеристиках и энергопотреблении.

Следующая проблема, решенная в представленной работе, заключается в слабых поисковых характеристиках, малой дальности действия и значительном энергопотреблении относительно нового класса оптико-электронных приоров – лазерных локационных каналов (ЛЛК). ЛЛК предоставляют возможность обнаружения замаскированных ОЭП разведки и прицеливания на дальностях недоступных каналам на других физических принципах и, на взгляд автора, существенно повышают характеристики МОЭП как системы. В работе исследуются методы повышения характеристик ЛЛК до уровня оправдывающего его включение в состав МОЭП.

Методы повышения скорости обзора и дальности действия лазерного локационного канала использованы в псевдобинокулярном двухканальном приборе наблюдения. Частично методы использованы в двухканальном приборе обнаружения угроз разработки Филиала ИФП СО РАН "КТИПМ" и серии антиснайперских ночных прицелов 1ПН106, 1ПН119, 1ПН120, 1ПН123 АО "Швабе-приборы".

Предложенные методы применимы не только в локационных каналах, но и в активно-импульсных системах наблюдения и технического зрения в целом: приборы вождения наземного и скоростного водного транспорта, приборы охраны периметров, инженерные боеприпасы. Как подвид активных систем, эти методы могут использовать и полевые системы индуцированной лазерной флюоресценции.

Результаты разработки оптических систем приемных объективов ТПВК и ЛЛК, а также проекционной системы ЛЛК (наряду с электронными схемами, программным обеспечением и конструктивными решениями) обеспечивают практическую реализацию метода совмещения изображений каналов, а также предельное качество изображения каналов, допускаемое форматом и

спектральным диапазоном фотоприемных матриц при приемлемых массогабаритных характеристиках многоканальный оптико-электронных приборов наблюдения.

### **Реализация результатов работы**

Решения по построению малогабаритного МОЭП, интеграции каналов в едином масштабе в едином информационном поле, оптическим системам каналов, методам повышения характеристик лазерного локационного канала исследованы и испытаны в разработанных и изготовленных Филиалом ИФП СО РАН "КТИПМ" макетных образцах двухканального прибора наблюдения в формате госбюджетной НИР "Исследование принципов и путей создания перспективных оптико-электронных приборов наблюдения", шифр "Засада-Н" и договоров поставки №№ 42 и 43 от 01.02.2007 с ГосНИИПП, Санкт-Петербург. Приборы прошли в установленном порядке приемосдаточные испытания, включая стендовые испытания и полигонные, а также опытную войсковую эксплуатацию.

Разработаны и испытаны, в составе прибора, образцы широкоспектрального объектива суперапохромата диапазона 0,45–0,88 мкм. Подтверждены стабильность положения фокальной плоскости (отсутствие хроматизма положения) в рабочем диапазоне и пространственное разрешение, обеспечивающее реализацию разрешения ЭОПа.

Разработаны и испытаны, в составе прибора, образцы проекционной системы, переносящей изображение с экрана ЭОПа на фотоприемную матрицу ПЗС с увеличением, регулируемым в пределах 10%. Подтверждена возможность выравнивания масштабов изображений тепловизионного и лазерного локационного каналов регулировкой увеличения проекционной системы по вертикали и подстройкой масштаба, в гибридном процессоре изображения по горизонтали.

Разработаны и испытаны, в составе прибора, образцы объективов неохлаждаемого тепловизионного канала. Трехлинзовые объективы с относительным отверстием 1:1.2 обеспечили полную реализацию

пространственного разрешения микроболометрического фотоприемника. Пространственное разрешение подтверждено полевыми испытаниями на дальность распознавания ростовой фигуры солдата и транспортных средств, а также на коллиматоре для измерения температурно-частотной характеристики "Орхон" (разработчик и изготовитель ГИПО, Казань) в ЦКБ "Точприбор", Новосибирск.

Акты об использовании результатов диссертационной работы приведены в приложении А.

**Достоверность результатов** работы и их практическая применимость подтверждена неоднократными полигонными и полевыми испытаниями разработанных приборов. В частности, полевые испытания по дальности действия и другим характеристикам назначения проводились на полигонах ЦНИИ "Точмаш" г. Климовск, в/ч 21374 МО РФ г. Гороховец, в/ч 52684 МО РФ г. Нахабино, в/ч 22316 МО РФ с. Шилово, ФГУП ГосНИИПП г. Приозерск, ОАО Ижмаш г. Ижевск, СТиС МВД г. Искитим.

Испытания на внешние климатические, вибрационные и ударные воздействия проводились на испытательном оборудовании КТИ ПМ, центра коллективного пользования СО РАН, Новосибирского филиала СТиС МВД РФ, в/ч 21374 МО РФ и ФГУП ЦНИИ "Точмаш".

### **Личный вклад**

Все основные результаты, выводы и научные положения, приведенные в диссертационной работе, получены лично соискателем. Вклад соискателя в проведенных исследованиях и публикациях результатов заключается в изобретении методов достижения результатов и повышения характеристик, руководстве разработкой экспериментальных образцов, постановке задач исследований, расчетах характеристик назначения приборов и каналов, разработке частных технических заданий на электронные узлы и конструкцию опытных и экспериментальных образцов, габаритных и абберационных расчетах оптических систем, проведении экспериментов и испытаний.



## **Публикации и апробация работы**

Результаты диссертационного исследования А.В. Голицына опубликованы более чем в 30 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 7, из них работ в научных журналах, индексируемых базами Scopus и Web of Science – 4, а также в материалах конференции, индексируемой базами Scopus и Web of Science – 1. Автором получены 6 патентов Российской Федерации на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Промежуточные результаты работы докладывались и обсуждались на многих научных и научно-технических конференциях:

- Научный конгресс "СибОптика" ("Гео-Сибирь"), Новосибирск, 2009–2014;
- Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой наноэлектроники "Фотоника", Новосибирск, 2008–2018;
- Международная конференция "Прикладная оптика", Санкт-Петербург, 2012, 2014
- Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, г. Москва, 2006–2014;
- Научно-практическая конференция "Проблемы обеспечения взрыво-безопасности и противодействия терроризму", г. Санкт-Петербург, 2013.

Приборы демонстрировались на выставках:

- Международная выставка "Интерполитех", г. Москва, 2009–2014;
- Международный салон "Комплексная безопасность", г. Москва, 2012–2014;
- Международная выставка вооружения, военной техники и боеприпасов "Российская выставка вооружения. Нижний Тагил-2009", г. Нижний Тагил, 2009 г.;
- Международная выставка высокотехнологичной техники и вооружений ВТТВ 2009, г. Омск;

- День инноваций Министерства обороны РФ, г. Москва, 2013;
- Международная специализированная выставка лазерной, оптической и оптоэлектронной техники "Фотоника. Мир лазеров и оптики", Москва, 2008; Сюжеты о приборах демонстрировались по центральным телевизионным каналам: Россия-1, Россия-2, РИА Новости, Russia Today.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, одного приложения. Объем диссертационной работы – 116 страниц, в том числе рисунков – 70, таблиц – 12.

### **Благодарности**

Соискатель выражает благодарность коллективу сотрудников Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ», принимавшим участие в разработке, изготовлении и отладки экспериментальных образцов двухканального прибора наблюдения. Наиболее значительный вклад внесли: Журов Гарри Евгеньевич (общее руководство разработкой электроники, электроника и ПО тепловизионного канала, fusion-процессора и микродисплеев, экранного и кнопочного интерфейсов), Чибурун Сергей Дмитриевич (электроника и ПО цифровой телекамеры лазерного локационного канала, управление АИ режимами ЭОПа, фары и телекамеры), Чепурко Николай Иванович (электроника источника питания ЭОП и лазерной фары), Голицын Александр Андреевич (контроллер привода), Ковалев Аристарх Михайлович (микродисплей), Яшина Татьяна Владимировна (конструкция и оснастка), Алантьев Дмитрий Владимирович (сборка и юстировка, исследования и испытания), Новгородов Борис Николаевич (ПО внешнего компьютера).

## ГЛАВА 1 ОБЗОР СО ВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ РУЧНЫХ И ПЕРЕНОСНЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ

### 1.1 Многоканальные ручные и переносные приборы наблюдения

В настоящее время существует достаточно много многоканальных оптико-электронных приборов наблюдения и прицеливания. Во избежание чрезмерного объема обзора за счет приборов второстепенных производителей, рассмотрены приборы только известных авторитетных производителей, имеющие не менее двух оптико-электронных каналов, дающих изображение телевизионного типа. Наиболее известными и авторитетными разработчиками и производителями ручных и переносных многоканальных приборов являются Raytheon, США, Safran, Франция, Thales, Евросоюз, Selex ES, Италия.

Поскольку среди множества производимых ручных и переносимых многоканальных приборов не обнаружено ни одного прибора, предоставляющего единое совмещенное изображение двух и более каналов, в обзоре дополнительно упомянут прибор нашлемного типа, выдающий в окуляр совмещенное изображение двух каналов.

Например, семейство SOPHIE разработки общеевропейского консорциума Thales включает все возможные варианты тепловизионных охлаждаемых и неохлаждаемых каналов, дополненных однотипными ОЭ каналами и функциональными модулями.

Вариант для дальнего наблюдения SOPHIE-MF [15] отличается наличием криогенного фотоприемника диапазона 8–12 мкм с холодильной машиной Стирлинга (Рис. 1).



Рисунок 1 – Внешний вид SOPHIE-MF, Thales

Кроме собственно оптико-электронных визирных каналов прибор также содержит электронный компас и GPS приемник. Масса основного комплекта составляет 3,5 кг. Выдача изображения на внешние устройства возможна по видеовыходу. Предусмотрен внешний интерфейс управления RS 422. Основные характеристики прибора представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные технические характеристики SOPHIE-MF, Thales

Тип тепловизионного фотоприемника	Криогенный
Холодильная машина:	Цикл Стирлинга
Формат изображения	754×576
Спектральный диапазон	8–12 мкм
Время выхода на режим	5 мин
Поле зрения	8°×6° / 3.2°×2.4°
Дальность распознавания/обнаружения РФС (в узком поле зрения)	2000 / 5000 м
Дальность распознавания/обнаружения БТТ (в узком поле зрения)	4/10 км
Разность температур эквивалентная шуму	<50 мК
Телевизионный видимый канал	поставляется опционально
Поле зрения видимого канала	3.7°×2.8°

В открытых источниках не сообщаются сведения ни по среднему энергопотреблению прибора, ни по потреблению во время выхода на режим криогенной машины.

Опциональный характер ТВ канала, несогласованного по полю зрения с ТПВ каналом, позволяет достаточно уверенно предположить отсутствие единого изображения каналов в едином масштабе.

Другим примером является SOPHIE-XF. Он отличается криогенным фотоприемником среднего тепловизионного диапазона спектра 3–5 мкм с холодильной машиной Стирлинга [16] и вариообъективом 6<sup>x</sup>. Внешний вид представлен на рис. 2.



Рисунок 2 – Внешний вид SOPHIE-XF, Thales

Опционально, прибор может содержать также дневную камеру с неуказанным полем зрения и лазерный целеуказатель на 830 нм. Кроме оптико-электронных каналов, прибор содержит электронный компас и GPS приемник. Прибор может использоваться также для фиксации фотоснимков и видео. Основные характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные технические характеристики SOPHIE-MF, Thales

Тип тепловизионного фотоприемника	Криогенный
Холодильная машина:	Стирлинга
Формат изображения	384×288
Спектральный диапазон	3–5 мкм
Время выхода на режим	3,5 мин
Поле зрения	15°×11,2° / 2,5°×1,9°
Дальность распознавания/обнаружения РФС (в узком поле зрения)	2,5 / 7 км
Дальность распознавания/обнаружения БТТ (в узком поле зрения)	5/13 км
Разность температур эквивалентная шуму	30 мК

Масса основного комплекта составляет 3,5 кг. Эта же платформа в варианте без дальномера, компаса и GPS приемника SOPHIE-ZS имеет массу 2,4 кг. В открытых источниках не сообщаются сведения ни по среднему энергопотреблению, ни по потреблению во время выхода на режим криогенной машины.

Опциональный характер ТВ канала, с неуказанным полем зрения, позволяет достаточно уверенно предположить отсутствие единого изображения каналов в едином масштабе.

SOPHIE-UF содержит неохлаждаемый тепловизионный, дневной телескопический и лазерный дальномерный каналы [17]. Внешний вид представлен на рис. 3. Масса прибора составляет 3,4 кг. Прибор работает от литиевых аккумуляторов формата AA, количество которых не раскрыто. От внешней батареи BA5590 12В × 1800 Ач прибор работает 24 ч, что соответствует энергопотреблению 9 Вт. Основные характеристики представлены в таблице 3.



Рисунок 3 – Внешний вид SOPHIE-UF, Thales

Таблица 3 – Основные технические характеристики SOPHIE-UF, Thales

Тип тепловизионного фотоприемника	Матрица микроболометров
Формат изображения	640×480
Спектральный диапазон	8–12 мкм
Поле зрения	7°
Электронное увеличение	3х
Дальность распознавания/обнаружения РФС	1200 / 2500 м
Дальность распознавания/обнаружения БТТ	2/5 км
Тип дневного визирного канала	телескопический
Оптическое увеличение	6х
Поле зрения	7°
Дальность распознавания/обнаружения РФС	6/8 км
Дальность распознавания/обнаружения БТТ	10/15 км
Длина волны дальномера	1,535 мкм
Диапазон измеряемой дальности	20 м ... 19995 м

Выдача на внешние дисплеи возможна в видеоформатах PAL или NTSC. Поскольку дневной канал прибора – это телескопический визир, о совмещенном изображении речь очевидно не идет.

Семейство JIM LR/HR/UC разработки концерна Safran SA, Франция, так же, как и линейка приборов Thales, включает набор однотипных ОЭ каналов и функциональных модулей вокруг трех вариантов тепловизионных каналов.

Прибор JIM LR отличается криогенным тепловизионным каналом диапазона 3–5 мкм. Формат тепловизионного изображения 384×288. В версии HR используется аналогичный фотоприемник, но форматом 640×480 [18, 19]. Кроме визирных каналов, прибор также содержит электронный компас и GPS приемник. Сведения по энергопотреблению не сообщаются. Масса прибора составляет 2,8 кг. Внешний вид представлен на рис. 4.



Рисунок 4 – Внешний вид JIM LR, Safran

Существует также облегченная версия Observer без функциональных узлов и каналов топопривязки и целеуказания (ЛДК, лазерный целеуказатель, компас и GPS приемник и др.).

Заявляется о слиянии изображений каналов изображения (image fusion) в версии прибора LR, в качестве опции, однако, что понимается под этим, не раскрывается. Ни один источник не содержит наложенных изображений каналов. Вызывает сомнение возможность такой функции в качестве опции, поскольку стоимость электронных компонентов для ее реализации ничтожна по сравнению со стоимостью криогенного тепловизионного канала. Те же соображения

относятся к энергопотреблению, габаритам, массе и прочим ресурсам. Поэтому, если слияние изображений действительно реализовано, то нет никаких разумных причин предлагать его как опцию. Возможно, под опцией, понимается возможность наблюдать как совмещенное, так и отдельное изображение.

Прибор JIM UC является версией JIM HR на базе неохлаждаемого тепловизионного канала. Внешний вид представле на рис. 5. Он содержит аналогичные каналы, функциональные модули и интерфейсы. Кроме оптико-электронных каналов, прибор также содержит электронный компас и GPS приемник. Сведения по энергопотреблению не сообщаются. Масса прибора составляет 2,3 кг без аккумуляторов.



Рисунок 5 – Внешний вид JIM UC, Safran

Аналогично версиям LR/HR, заявляется о слиянии изображений каналов изображения (image fusion), в качестве опции, однако, что понимается под этим, не раскрывается. Примеров совмещенных изображений каналов в открытых источниках не приводится.

Американские приборы представлены семейством Recon производства Flir. Прибор Recon B2 отличается криогенным фотоприемником диапазона 3–5 мкм, формата 640x480 [20]. Версия Recon B2-FO (forward observer) комплектуется цветным телевизионным каналом, в то время как версия Recon B2-DC (dual channel) комплектуется вторым ТПВ каналом на неохлаждаемой матрице микроболометров. Для одновременного вывода каналов предусмотрен режим разделения экрана «split screen display». Внешний вид прибора представлен на рис. 6. Основные характеристики прибора представлены в таблице 4.





Рисунок 6 – Внешний Recon B2, Flir

Таблица 4 – Основные технические характеристики Recon B2, Flir

Тепловизионный визирный канал	
Фотоприемное устройство	InSb 640×480 (опционально 320×240)
Спектральный диапазон	3–5 мкм
Поле зрения	10°×8° / 2,5°×1,8°
Электронное увеличение	1х, 2х, 3х, 4х
Телевизионный визирный канал (версия B2-FO)	
Фотоприемное устройство	Цветная ПЗС 1/4" 794×494
Поле зрения	10°×8° / 2,5°×1,8°
Пороговая освещенность	0,1 лк
Электронное увеличение	1х, 2х, 3х, 4х
Второй тепловизионный визирный канал (версия B2-DC)	
Фотоприемное устройство	неохлаждаемая матрица микроболометров 640×480
Спектральный диапазон	8–12 мкм
Поле зрения	18°

Микродисплей прибора бинокулярный на двух матрицах органических светодиодов (OLED). Помимо визирных каналов прибор содержит электронный компас и GPS приемник, а также лазерный дальномер с длиной волны 1,54 мкм и лазерный целеуказатель с длиной волны 852 нм и мощностью 30 мВт.

Масса прибора составляет 4 кг с аккумуляторами. Энергопотребление 16 Вт. Используется 6 литиевых аккумуляторов формата D.

Рекламный буклет производителя сообщает о наличии «непрерывного оптического увеличения» (continuous optical zoom). Однако, наличие также утверждений о непрерывном электронном увеличении 1–4х, подозрительное совпадение кратности узкого и широкого полей зрения с электронным увеличением, отсутствие важнейших данных по дальности действия, наводят на подозрение о том, что весь набор увеличений ограничивается электронными увеличениями.

В рекламном проспекте не сообщается о возможности совмещения изображений каналов.

Другим представителем семейства является прибор Recon B9. В качестве основного он имеет неохлаждаемый микроболометрический тепловизионный канал формата 640×480 и телевизионный канал на цветной матрице ПЗС [21]. Версия Recon B9-FO (forward observer) дополнительно комплектуется дальномером и модулями геолокации (рис. 7). Для одновременного вывода каналов предусмотрен режим разделения экрана «split screen display».



Рисунок 7 – Внешний Recon B9 (слева) и Recon B9-FO, Flir

Прибор в версии B9-FO дополнительно содержит электронный компас, GPS приемник и лазерный дальномер с длиной волны 1,54 мкм. У обоих приборов микромонитор как и у R2 бинокулярный на двух матрицах органических светодиодов OLED. Масса прибора в версии B9 составляет 1,7 кг, а в версии B9-FO – 2,5 кг с аккумуляторами.

Версия В9 потребляет 6 Вт от 6 литиевых аккумуляторов формата АА, обеспечивающих непрерывную работу до 4 ч. Версия В9-FO потребляет 11 Вт от 2 литиевых аккумуляторов формата D, обеспечивающих непрерывную работу до 5 ч. Технические характеристики приборов представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные технические характеристики Recon В9, Flir

Тепловизионный визирный канал	
Фотоприемное устройство	Неохлаждаемая матрица VOx 640×480 (опционально 320×240)
Спектральный диапазон	8–12 мкм
Поле зрения	9,3°×7°
Электронное увеличение	1х, 2х, 3х, 4х
Телевизионный визирный канал	
Фотоприемное устройство	цветная ПЗС-матрица 1/4" 794×494
Пороговая освещенность	0,1 лк
Поле зрения	9,3°×7°
Электронное увеличение	1х, 2х, 3х, 4х

В рекламном проспекте не сообщается о возможности совмещения изображений каналов.



Рисунок 8 – Прибор Linx, Selex ES

Похожим изделием является Linx, производства Selex ES, Италия (рис. 8). Прибор содержит неохлаждаемый тепловизионный визирный канал, цветной телевизионный канал, лазерный дальномерный канал, а также цифровой компас и приемник GPS [22].

Основные технические характеристики перечислены в таблице 6. Как и у вышеперечисленных приборов других производителей, в рекламном проспекте на данный прибор не сообщается о возможности совмещения изображений каналов.

Таблица 6 – Основные технические характеристики Linx, Selex ES

Тепловизионный визирный канал	
Фотоприемное устройство	Неохлаждаемая матрица 320×240
Спектральный диапазон	8–12 мкм
Поле зрения	8,8°×6,6°
Разность температур эквивалентная шуму	50 мК
Телевизионный визирный канал	
Поле зрения	2,7°×2,0°/ 8,8°×6,6°
Длина волны лазерного дальномера	1,55 мкм
Максимальная измеряемая дальность	2500 м
Дальность распознавания/обнаружения РФС	700 м / 1200 м
Дальность распознавания/обнаружения БТТ	800 м / 2700 м
Масса с батареями	2,5 кг

Формат фотоприемника визирного канала видимого диапазона не раскрыт. Способ смены увеличений так же не раскрыт. Не исключено использование электронного масштабирования.

Отдельно следует упомянуть AN/PSQ-20A компании Exelis, США (выделившейся в результате разделения компании ИТТ). Несмотря на то, что прибор относится к классу наשלемых приборов, о нем невозможно не упомянуть по причине того, что этот прибор является единственным зарубежным двухканальным прибором, в котором продемонстрировано наложение изображений каналов в окуляре. Прибор имеет окулярный канал ночного видения

(НВ) на электронно-оптическом преобразователе и неохлаждаемый тепловизионный канал на микроболометрической матрице форматом 320×240 [23]. На рис. 9 представлен внешний вид прибора.



Рисунок 9 – AN/PSQ-20A, Exelis

Масса прибора составляет 900 г, а энергопотребление позволяет работать от 3 литиевых аккумуляторов формата AA не менее 7.5 часов. Тепловизионный канал позволяет обнаруживать в прибор замаскированные активные цели, невидимые в канал НВ, в то время как канал НВ позволяет более качественно отобразить фоновую обстановку. Совмещенное изображение каналов (рис. 10) ярко демонстрирует преимущества, как двухканальной системы наблюдения, так и единого изображения.

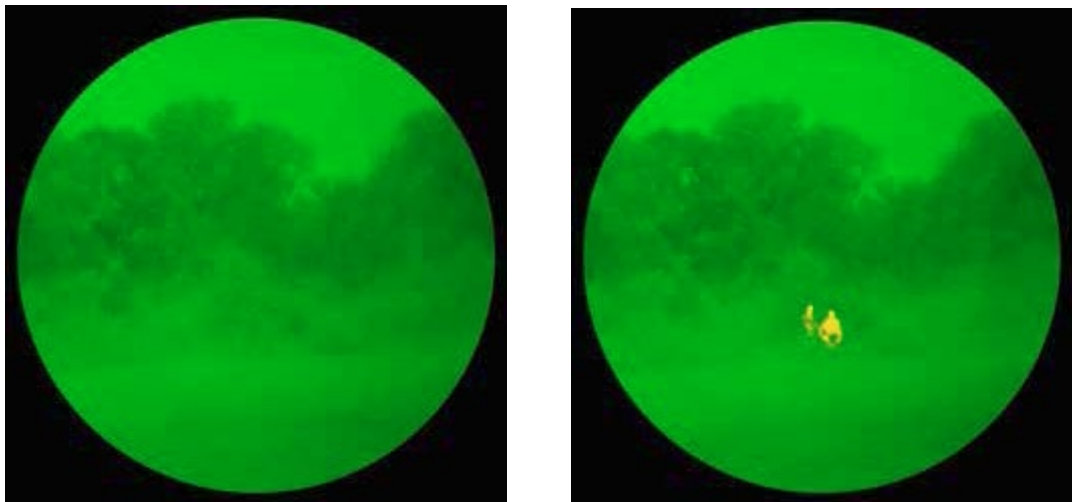


Рисунок 10 – Изображение в окуляре AN/PSQ-20A канала ночного видения (слева) и совмещенное изображение НВ и ТПВ каналов (справа)

Таблица 7 – Основные технические характеристики AN/PSQ-20A, Exelis

Тепловизионный визирный канал	
Фотоприемное устройство	Неохлаждаемая матрица 320×240
Спектральный диапазон	8–12 мкм
Поле зрения	28° (диагональ)
Окулярный канал ночного видения	
Фотоприемное устройство	ЭОП с фотокатодом 18 мм
Поле зрения	38° (диагональ)
Пространственное разрешение при освещенности $10^{-3}$ лк	$-1,3 \text{ мм}^{-1}$

## 1.2 Тепловизионные каналы многоканальных оптико-электронных приборов

В обзоре многоканальных приборов тепловизионные каналы: неохлаждаемые, криогенные среднего тепловизионного диапазона 3–5 мкм и дальнего тепловизионного диапазона 8–14 мкм представлены достаточно подробно. Из представленных материалов видно, что для оптико-электронных приборов дальнего наблюдения на дальности порядка нескольких километров используются криогенные тепловизионные каналы, а на дальностях менее 1,5 км активно используются неохлаждаемые микроболометрические каналы. Выбор охлаждаемого тепловизионного канала, помимо примерно десятикратного роста стоимости канала (наиболее дорогого и определяющего стоимость изделия), оплачивается также ростом энергопотребления не менее 5 Вт после выхода приемника на режим (15 Вт на включении), прибавкой примерно 1,5 кг массы и 3–5 минут выхода на рабочий режим после включения.

Основное преимущество криогенного ТПВ канала в том, что он обеспечивает примерно равную разность температур эквивалентную шуму, при вдвое меньшем относительном отверстии, что дает экономию массы при фокусных расстояниях свыше 150–200 мм, а также возможность смены увеличений без радикального роста массы объектива.

На меньших фокусных расстояниях и соответствующих дальностях действия выбор на сегодня решается в пользу неохлаждаемых тепловизионных каналов.

Таблица 8 представляет достаточно характерное сравнение двух прицелов для стрелкового оружия, разработанных под одни требования по дальности.

Таблица 8 – Сравнение прицелов для стрелкового оружия

ТТХ	AN/PAS-13 B Raytheon, США	AN/PAS-13 D(V) 3 DRS, США
Спектральный диапазон	3–5 мкм	8–12 мкм
Тип фотоприемника	Субматрица КРТ, 40×16, с термоэлектрическим охладителем	Неохлаждаемая матрица микроболометров VOx, 640×480, шаг 25 мкм
Дальность распознавания ростовой фигуры	1200 м	1200 м
Дальность обнаружения движущейся фигуры	2800 м	2200 м
Поле зрения	9°×5,4°	9°×6,9°
Увеличение	3,3 / 10х	3 / 10х
Элементы питания	BA-5347, Li-ion	6×AA
Длительность непрерывной работы	3,5 ч	3 ч
Время выхода на режим	120 с	4 с
Габариты	460×160×160 мм	406×108×140 мм
Масса с аккумуляторами	2,5 кг	1,9 кг

Прицелы имеют примерно одинаковые поля зрения и пространственное разрешение. При равной дальности распознавания и несколько более высоких характеристиках обнаружения, прибор с криогенным приемником весит примерно на 20% больше и требует в 5 раз более емкого источника питания (6 В × 11 Ач против 6 × 1,2 В × 1,8 Ач).



### 1.3 Лазерные локационные каналы и приборы

В географии разработки и производства лазерных средств локации оптических систем наблюдается редкая картина – из 6 известных серийных (не экспериментальных и не единичных экземпляров, изготовленных в научных целях) приборов 4 разработаны и производятся в России.

Лазерный локатор SLD 500 (рис. 11) французского производства предназначен для обнаружения снайперских прицелов и оптико-электронных приборов [24]. Масса оптико-электронного блока составляет 29 кг, а всего комплекта – 120 кг. Поле зрения составляет  $7^{\circ} \times 5^{\circ}$ .



Рисунок 11 – Лазерный локатор SLD 500 с приводом на треноге и пульт управления/монитор в кейсе

Кроме локационного канала оптико-электронный блок содержит ТВ канал высокого разрешения, лазерный дальномер, лазерный целеуказатель, электронный компас и инклинометр. Существует также вариант исполнения SLD500 LR, докомплектованные тепловизионной камерой.

Прибор питается от бортовой сети 24 В или сети электроснабжения 110/220 В, величина энергопотребления не сообщается. Предыдущая разработка SLD400 имела энергопотребление локационной части 35 Вт, пульта дистанционного управления на основе ПК 45–70 Вт и привода наведения 40–110 Вт в зависимости от режимов работы.



Лазерный прибор для локации оптических систем Призрак-М (Талос, Россия) предлагается в шести модификациях, адаптированных под городское (TLS 13x4), полевое (TLS 20x4) и комбинированное (TLS 16x4) применение. Внешний вид показан на рис. 12.



Рисунок 12 – Лазерный локаатор Призрак-М

Прибор производит зондирование пространства лазерной фарой (рис. 13) в поле  $4^\circ \times 3^\circ$  в диапазоне от 10 до 2500 м с дискретно выбираемой глубиной строка дальности 10/20/50/500 м [25, 26].



Рисунок 13 – Изображение в окуляре лазерного локаатора "Призрак-М" серии ТЛС 2000. Наблюдаемые цели: бинокль БПО 8x40 на дистанции 930 м (левый блик) и прицел ПСО-1 на дистанции 950 м (правый блик)

Прибор на базе ЭОПа третьего поколения использует активно-импульсный метод наблюдения, позволяющий подавить яркую засветку фона при естественной дневной освещенности при сохранении изображения фона.

Изображение с экрана ЭОПа поступает в ТВ камеру. Дальность обнаружения прибора с входным зрачком 30 мм достигает 1000 м, однако в открытых источниках не сообщаются существенные подробности об освещенности, при которой обеспечивается указанная дальность и о длительности поиска.

Использование ЭОПа третьего поколения вызывает недоумение, поскольку высокая чувствительность в приборах данного класса, работающих при освещенности до 100 000 лк, не требуется, а сам ЭОП является скорее высокоскоростным затвором. При этом, ЭОП третьего поколения отличается от второго низким ресурсом (без ионно-барьерной пленки) и более значительным ореолом вокруг ярких объектов, снижающим отношение сигнал/фон точечных объектов.

Основные технические характеристики прибора приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Основные технические характеристики TLS-2000

Поле зрения	5,5°×4,1°
Поле зондирующего излучения	4°×3°
Дальность распознавания ростовой фигуры	600 м
Дальность обнаружения прибора с входным зрачком 30 мм	1000 м
Поколение ЭОП	3
Стандарт видеосигнала	CCIR
Энергопотребление	10 Вт
Длительность непрерывной работы	3,5 ч
Масса с батареей	1,8 кг
Габаритные размеры	235×145×70 мм

Другим примером является лазерный прибор для локации оптических систем Мираж 1200 (рис. 14) производится компанией Транскрипт, Россия [27]. Прибор также использует активно-импульсный метод зондирования пространства, обеспечивающий возможность работы в условиях дневной и ночной освещенности. Прибор имеет стробируемый импульсный ЭОП, с экрана которого изображение передается в ТВ камеру.



Рисунок 14 – Лазерный локатор Мираж-1200

Заявленная максимальная дальность обнаружения оптических приборов составляет 1200 м, поле зрения визирного канала  $4,5^{\circ} \times 3,3^{\circ}$ . Масса прибора 2,3 кг, а габаритные размеры  $325 \times 140 \times 80$  мм. Длительность непрерывной работы от аккумулятора составляет 1,5 часа, энергопотребление – 13 Вт.

Интересным изделием является прицел TLOS. Первые сообщения о прицеле с такой аббревиатурой (Target Locator and Observation System) появились в 1997 г. Однако, с тех пор о приборе, его разработчике и производстве сведения не упоминались вплоть до 2007 и 2010 года, когда Министерство обороны США объявило контракт на обслуживание и ремонт этого прицела под индексом AN/PLQ-8 (рис. 15). Согласно контракту, исполнителю предлагалось обслуживать по 18 прицелов в год в течение трех лет [28]. В этих предложениях, в качестве владельца документации была упомянута компания BAE Systems, Nashua, NH.



Рисунок 15 – Лазерный локатор AN/PLQ-8, BAE Systems, США

Прицел содержит ЭОП и лазерную фару, предназначенную для поиска оптических целей. Прибор имеет два увеличения 4х и 12х и способен работать в условиях дневной и ночной освещенности. Прибор может использовать фару для целеуказания средствам авиационной поддержки или доставки десанта.

Лазерный анτισнайперский прицел 1ПН106 (рис. 16) и его варианты под различные виды оружия 1ПН119, 1ПН120, 1ПН123 разработаны ЦКБ «Точприбор», Россия по инициативе и при участии соискателя [29].



Рисунок 16 – Анτισнайперский прицел 1ПН106, АО "Швабе-приборы",  
г. Новосибирск

Прибор осуществляет модуляцию зондирующего излучения с частотой 3 Гц, позволяющей понизить критическое для обнаружения отношение сигнал/фон в 2.5 раза и, соответственно, повысить дальность обнаружения цели или поле зрения [30]. Прибор имеет окулярный выход с экрана ЭОПа, что обуславливает низкое энергопотребление по сравнению с приборами, формирующими телевизионное изображение. Технические характеристики приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Основные технические характеристики 1ПН106

Видимое увеличение, крат	3,7
Угловое поле зрения	9°
Угловое поле зондирующего излучения	1,5×0,65°
Дальность обнаружения прицела типа ПСО-1	не менее 900 м
Дальность распознавания ростовой фигуры день/ночь, не менее	600 м / 450 м
Фокусное расстояние объектива	100 мм
Масса с батареей	3,5 кг
Время непрерывной работы, не менее	12 ч

Еще одним семейством приборов, осуществляющих обнаружение оптических приборов по бликам, является Антиснайпер (Антиснайпер-М2), производства МГТУ им. Баумана [31, 32]. Заявленная дальность действия устройств составляет не менее 800 м. Угловое поле зрения  $5^{\circ} \times 7^{\circ}$ , поле зондирующей лазерной подсветки  $2^{\circ} \times 3^{\circ}$ . В лазерном осветителе используется полупроводниковый излучатель с мощностью 2 Вт.

#### 1.4 Основные выводы по результатам первой главы

Типичный многоканальный оптико-электронный прибор наблюдения имеет как минимум два визирных канала – тепловизионный и телевизионный. Большинство приборов производится в виде линеек, в которых базовый прибор может дополняться приемником спутниковой навигации, цифровым компасом, инклинометрами и лазерным дальномером, целеуказателем и т.д.

Приборы FLIR, Safran, Thales имеют варианты с криогенными и термоэлектрическими охлаждаемыми, а также неохлаждаемыми тепловизионными каналами.

Типичное энергопотребление многоканальных оптико-электронных приборов наблюдения с криогенным тепловизионным каналом составляет 16 Вт, а с неохлаждаемым микроболометрическим тепловизионным каналом – 6 Вт. Охлаждаемый канал характерен для многоканальных приборов с большей на 70%

дальностью распознавания и повышает энергопотребление всего прибора в 2,7 раза при равной массе.

Обобщенные данные по дальности распознавания ростовой фигуры, массе и энергопотреблению представлены в таблице 11. В таблице символом \* отмечены расчетные оценки.

Таблица 11 – Данные по дальности распознавания ростовой фигуры, массе и энергопотреблению приборов, производимых FLIR, Safran, Thales, Selex

Наименование, производитель	Состав каналов	Дальность распозн. РФС, км	Масса, кг	Энергопотребление, Вт
SOPHIE-MF, Thales	Охл. ТПВК 8–12 мкм, ЛДК (ТВК)	2	3,5	
SOPHIE-XF, Thales	Охл. ТПВК 3–5 мкм, ЛДК (ТВК, ЛЦУ)	2,5	3,5	
SOPHIE-UF, Thales	Неохл. ТПВК, ЛДК, дневной телескопический канал	1,2	3,4	9*
JIM LR/ HR, Safran	Охл. ТПВК 3–5 мкм, ТВК, ЛДК (ЛЦУ)	2,5	2,8	
JIM UC, Safran	Неохл. ТПВК, ТВК, ЛДК (ЛЦУ)	1,2	2,3	
VIGILENS, Safran	Неохл. ТПВК, ТВК, ЛДК	0,85	2,3	
Recon B2-FO, FLIR	Охл. ТПВК, ТВК, ЛДК (ЛЦУ)	1,2*	4	16
Recon B2-DC, FLIR	Охл. ТПВК, неохл. ТПВК, ЛДК	1,2*	4	16
Recon B9-FO, FLIR	Неохл. ТПВК, ТВК, ЛДК (ЛЦУ)	1,2*	2,5	11
Recon B9, FLIR	Неохл. ТПВК, ТВК, ЛЦУ	1,2*	1,7	6
Linx, Selex ES	Неохл. ТПВК, ТВК, ЛД	0,7	2,5	

Не обнаружен ни один зарубежный ручной многоканальный прибор наблюдения, предоставляющий совмещенное в едином масштабе изображение визирных каналов телевизионного типа. Единственный прибор, выдающий совмещенное в едином масштабе изображение канала ночного видения и тепловизионного канала, – это AN/PSQ-20A компании Exelis, США, который относится к классу нацеленных и обеспечивает эту задачу оптическим совмещением изображений в окуляре, а не электронным способом.

Не обнаружен ни один многоканальный оптико-электронный прибор, содержащий лазерный канал локации оптико-электронных приборов, за исключением макета, описываемого в настоящей диссертационной работе.

Современные лазерные локационные средства позволяют наблюдать цель и фоновую обстановку в условиях дневной и ночной освещенности. Для подавления естественной яркости фона используются активно-импульсный принцип зондирования на базе стробируемого ЭОПа и синхронизированной лазерной фары, а также комбинированный спектральный фильтр на входе объектива ЭОПа. Поиск цели ведется оператором как по направлению, так и по глубине просматриваемого пространства, что серьезно затрудняет поиск. Приборы, дающие телевизионное изображение, имеют массу от 1,8 до 30 кг, а энергопотребление от 10 до 35 Вт.

## **ГЛАВА 2 СПОСОБ ОРГАНИЗАЦИИ ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПОЛЯ И СОГЛАСОВАНИЕ МАСШТАБОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ КАНАЛОВ ПЕРЕНОСНОГО МНОГОКАНАЛЬНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ**

### **2.1 Организация единого информационного поля**

Совмещение разномасштабных изображений и цифро-алфавитной информации в многоканальных оптико-электронных системах дает единую, быстро воспринимаемую картину наблюдаемого пространства. Совмещение изображений является ключом к использованию цифровых методов автоматического выявления различий в изображении каналов при наблюдении замаскированных целей и акцентированной визуализации таких отличий для оператора, неспособного к одновременному анализу разнородных потоков видеоданных нескольких каналов в реальном масштабе времени.

Однако, создание многоканальных систем наблюдения с совмещенным изображением каналов в едином информационном поле упирается в серьезные технические проблемы:

- различные форматы фотоприемных матриц и линеек каналов;
- различный шаг элементов фотоприемных матриц, в том числе по вертикали и горизонтали;
- взаимные помехи изображений каналов при наложении;
- различные искажения масштаба по полю зрения оптическими системами каналов;
- различное изменение масштабов каналов в температурном диапазоне.

По этим причинам, в настоящее время, многоканальные приборы интегрированы только в части использования единого дисплея для поочередного отображения каналов, либо в режиме «картинка в картинке», не предоставляя единого информационного поля.

В ручном приборе возникают дополнительные трудности – совмещение должно производиться в реальном масштабе времени, не должно быть затратным по вычислительным ресурсам (из-за ограничений по весу и энергопотреблению), а



результат должен выводиться на малоформатный дисплей, что исключает возможность некрatного электронного масштабирования каналов без потери пространственного разрешения.

Способам масштабирования и совмещения разнородных изображений, получаемых из различных источников, посвящена обширная литература. Достаточно хорошо проработаны вопросы привязки, масштабирования и поворота изображений из различных каналов, но, однако, при неограниченных временных и вычислительных ресурсах.

Для тепловизионных фотоприемных матриц, на сегодня, характерны форматы  $384 \times 288$ ,  $640 \times 480$  и  $1024 \times 768$ , а для телевизионных –  $1280 \times 960$ ,  $1932 \times 1452$  и более. При этом, формат вывода ограничивается микродисплеем, для которого доступны форматы  $800 \times 600$  и  $1280 \times 1024$ .

Очевидно, что доступные форматы изображений будут постоянно расти, но отрыв в пропорциях более массовых и технологически легких кремниевых матриц от более редких тепловизионных матриц будет сохраняться. Очевидно также, что дальность действия и поле зрения для прибора наблюдения являются основными характеристиками и, соответственно, факторами, определяющими постоянный спрос на увеличение формата при разумной стоимости и доступности матриц. При этом, даже ограниченность формата микродисплея не является причиной отказываться от максимально доступных форматов приемных матриц, поскольку максимальные дальность действия и поле зрения могут быть реализованы поочередно при электронном масштабировании изображения. Что менее удобно, но обоснованно.

В проблему разных форматов фотоприемников добавляет нюансы различие в критериях дальности действия каналов разных спектральных диапазонов. Например, тепловизионный диапазон в силу яркого свечения интересующих активных объектов, легко обходится 5-6 строками изображения для распознавания оператором ростовой фигуры, в то время как для телевизионных изображений требуется не менее 8 строк или 4 пар штрихов, согласно критерию Джонсона [33, с. 360]. Для обнаружения же оптических приборов телевизионным

каналом при помощи лазерного зондирования достаточно вообще одного пикселя. Но, для достижения максимальной дальности обнаружения, этот пиксель должен иметь минимальный угловой размер. Таким образом, форматы изображений различных каналов не только принудительно ограничены существующей элементной базой, но и по-разному востребованы каналами с точки зрения выполняемых задач.

Различный шаг фоточувствительных элементов матриц создает еще одну проблему. Изображения с двух матриц разного шага, при одинаковом фокусном расстоянии, будут отличаться и по масштабу, и по полю зрения, и по угловому размеру пикселя. (элементарное поле зрения).

Для интеграции изображений двух и более каналов в различных разработках и серийных приборах применялись следующие подходы:

## 2.2 Картинка в картинке (PiP)

Поле дисплея занято изображением одного из каналов. Уменьшенное изображение второго канала выводится в углу, занимая часть изображения первого канала (рис. 17). При использовании тепловизионной матрицы малого формата, строго говоря, изображение ТПВ канала может быть и не уменьшенным. Однако, в связи с доступностью матриц формата  $384 \times 288$  и выше и отсутствием какой-либо экономии (матрицы малых форматов не дешевеют, а просто снимаются с производства), достаточно трудно придумать резоны для использования матриц меньшего формата.

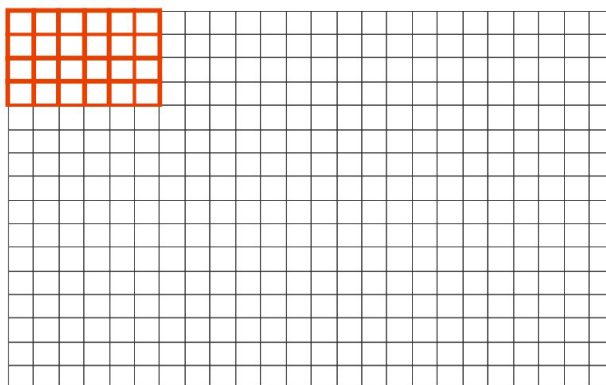


Рисунок 17 – Объединение изображений двух каналов методом «картинка в картинке»

Пример на рис. 18 иллюстрирует как саму реализацию метода PiP, так и сложность восприятия обстановки, даже при явном наличии сигнатур целей в обоих каналах.

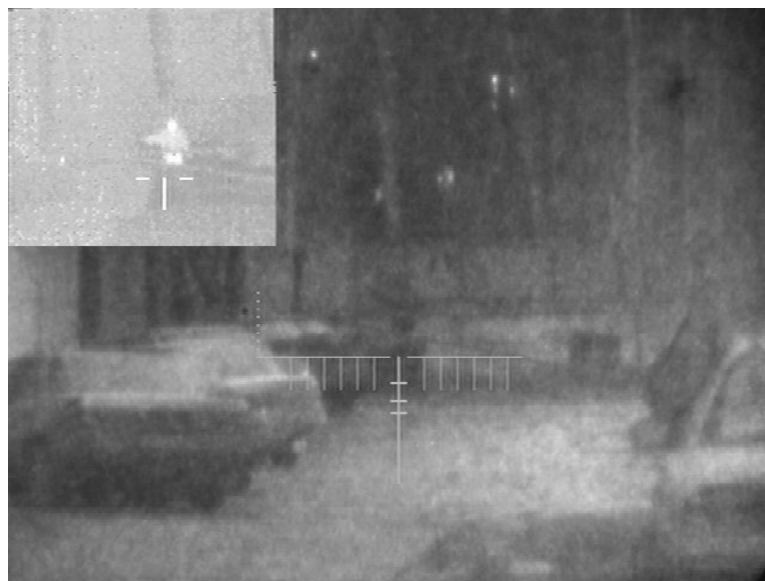


Рисунок 18 – Пример наложения изображений по типу «картинка в картинке», использованного в приборе ДОПС, Филиал ИФП СО РАН "КТИПМ"

Недостатки этого метода: отсутствует единая картина, не обеспечивается максимальная дальность обнаружения и распознавания канала, представленного меньшим форматом, не согласованы масштабы каналов.

### **2.3 Выравнивание фокусных расстояний приемных объективов**

Наложение изображений каналов с равными фокусными расстояниями  $f_1 = f_2$ , не имеет никаких разумных причин и упомянуто исключительно для полноты систематизации. Очевидно, что различные форматы и шаг фотоприемных матриц каналов гарантируют, что ни масштаб, ни поля зрения каналов не будут одинаковы, экран будет занят преимущественно изображением канала с большим шагом ФПМ при потере разрешения канала с меньшим шагом (рис. 19). Хотя подобные пропорции полей и появлялись в разработках бортовых МОЭП, содержащих тепловизионные и активно-импульсные ночные каналы, они не претендуют на одновременное наблюдение в едином поле и оправданы узким полем подсвета лазерной фары активно-импульсного канала.

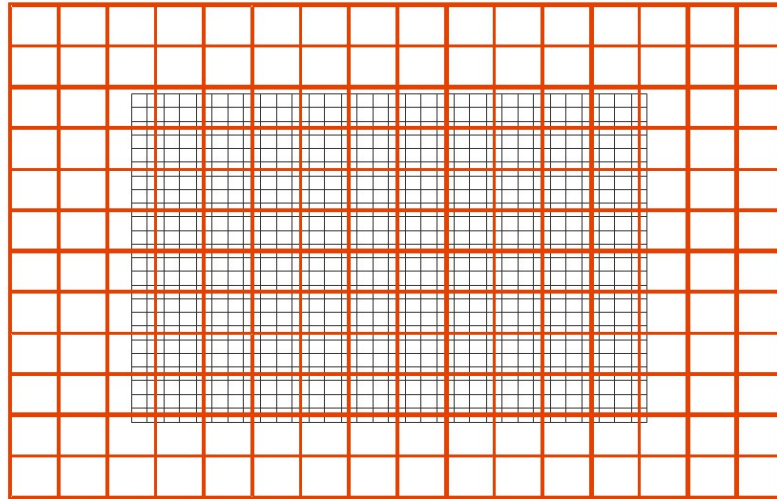


Рисунок 19 – Наложение изображений каналов с равными фокусными расстояниями

Недостатки: различный масштаб изображений, исключающий формирование единого информационного поля, потеря пространственного разрешения, дальности распознавания и обнаружения канала с меньшим шагом элементов ФПМ, несогласованные поля зрения.

#### 2.4 Выравнивание полей зрения каналов

Поля зрения выравниваются за счет соответствующей пропорции фокусных расстояний  $f_1/f_2 = A_1/A_2$ , где  $A_1$  и  $A_2$  – линейный размер фотоприемных матриц по выравниваемой координате (рис. 20).

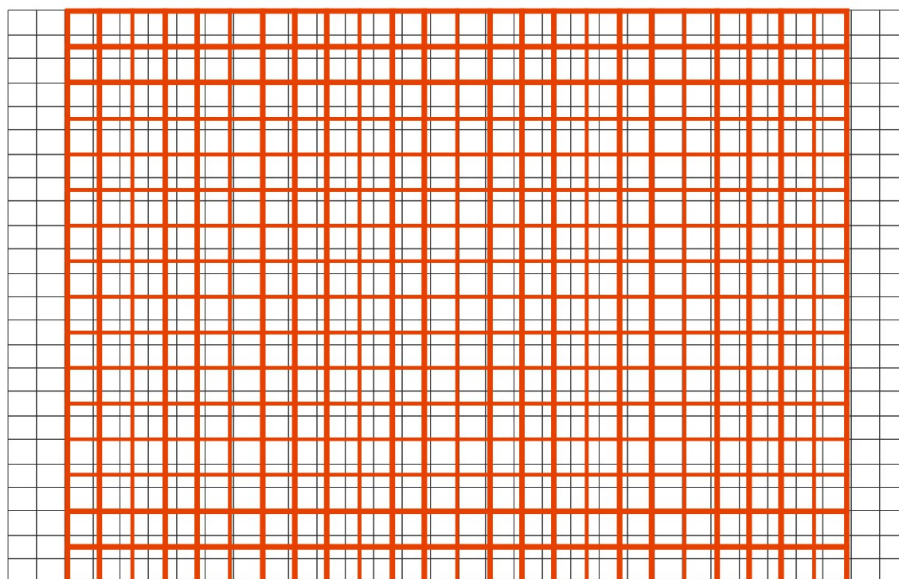


Рисунок 20 – Наложение изображений с выравниванием поля зрения  $W_1=W_2$

При таком методе обеспечивается достаточно близкий масштаб изображения, по крайней мере по одной координате. Однако, при таком подходе, необходимо пожертвовать пространственным разрешением одного из каналов.

При наличии дисплея с неограниченным разрешением, неограниченные вычислительных ресурсах и неограниченном энергопотреблении, такое наложение обеспечивается без проблем, а алгоритмы описаны в многочисленной литературе.

Однако, в малогабаритных переносных приборах наблюдения, микродисплей ограничен форматом, близким к форматам приемных матриц. При этом ограничении любое некратное масштабирование влечет необходимость определять в какую строку и в какой столбец микродисплея следует отнести каждый пиксель фотоприемной матрицы канала с соответствующей потерей пространственного разрешения.

В отечественных разработках такой подход отмечался лишь на заре попыток интеграции комплексированных приборов по изображению. Для линейки французских приборов компании Safran JIM LR/HR/MR/UC/VIGILENS, заявляются равные поля зрения ТПВ и цветного ТВ каналов, но ни один проспект или описание на сайте компании не содержат каких-либо примеров совмещенного изображения.

Достоинства: единый масштаб изображения каналов по одной из координат.

Недостатки: потеря пространственного разрешения одного из каналов, локальные искажения масштаба, достаточно ресурсоемкая и энергозатратная операция масштабирования.

## **2.5 Выравнивание элементарных полей каналов**

Способ наложения изображений при выровненных элементарных полях зрения  $\alpha_1 = \alpha_2$  позволяет обеспечить единый масштаб изображения без потери пространственного разрешения каналов и не требует значительных вычислительных ресурсов на масштабирование, а, соответственно, и энергозатрат.

Такой метод, однако, имеет недостаточно очевидные, но существенные недостатки, проистекающие от различной специализации каналов и критериев их дальности действия.

Как видно на рис. 21, канал с меньшим форматом имеет и меньшее поле зрения. Этим каналом как раз оказывается тепловизионный канал, имеющий серьезное преимущество при поиске целей, требующем максимального поля зрения.

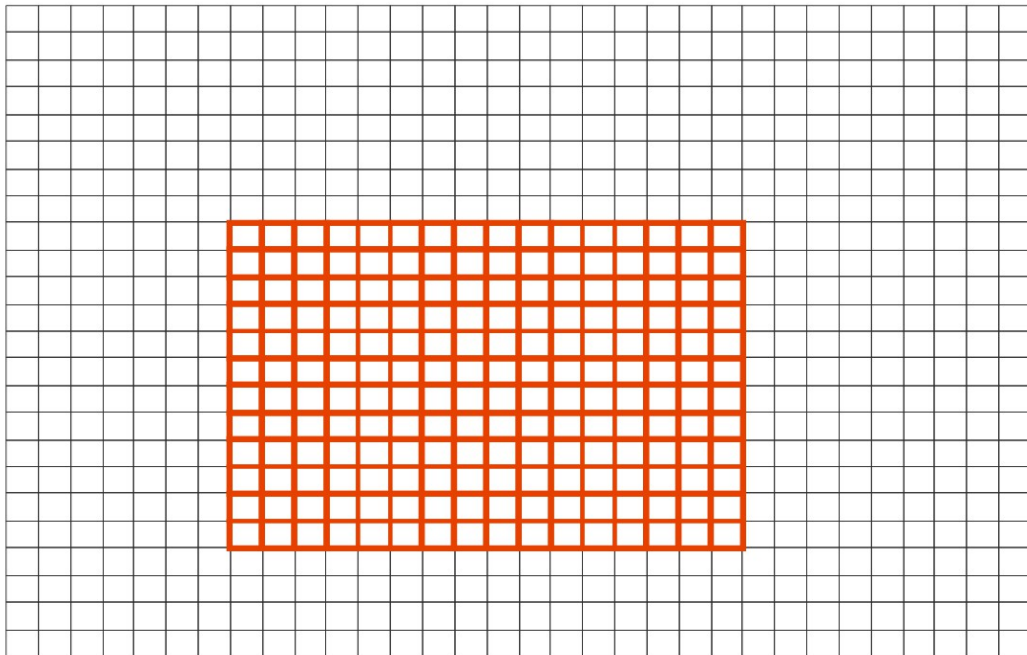


Рисунок 21 – Наложение изображений при выровненных элементарных полях зрения

Интересующие активные цели: военная техника, транспортные средства, люди и животные – имеют высокую яркость, позволяющую обнаруживать их при значительно меньшем количестве пикселей на высоту цели по сравнению с другими пассивными каналами.

Достоинства такого подхода: единый масштаб изображения каналов, полнота восприятия обстановки.

Недостатки: узкое совместное поле зрения каналов.

## 2.6 Выравнивание кратных элементарных полей

Соискателем предложен метод совмещения изображений [34–37], оптимальный для малогабаритных приборов с ограниченным энергопотреблением. Способ будет рассмотрен на примере двух каналов, один из которых содержит кремниевую матрицу большего формата, а другой – тепловизионную, примерно вдвое меньшего формата. Кремниевая матрица большего формата может обеспечивать МОЭП видимым и ближним ИК спектральными диапазонами, УФ диапазоном (при соответствующем легировании матрицы или другими методами), а может обеспечивать прием отраженного локационного сигнала. Может быть высокочувствительной или снабженной электронно-оптическим преобразователем для обеспечения работы в темное время суток. Во избежание излишнего усложнения описания, здесь ее будем именовать «телевизионной матрицей».

Пиксель элемента телевизионной матрицы отображается на пиксель микродисплея без пространственных преобразований, как есть. Пиксель тепловизионной матрицы вдвое превосходит по угловому размеру пиксель телевизионной матрицы. Это условие обеспечивается габаритным расчетом оптических систем каналов. Если оптические системы каналов состоят только из приемных объективов, то условие обеспечивается соответствующей пропорцией шага элементов матриц к фокусному расстоянию:

$$2 \cdot a_{\text{ТВМ}} / f_{\text{ТВК}} = a_{\text{ТПВМ}} / f_{\text{ТПВК}},$$

где  $a_{\text{ТВМ}}$ ,  $a_{\text{ТПВМ}}$  – шаг элементов телевизионной и тепловизионной матриц, а  $f_{\text{ТВК}}$ ,  $f_{\text{ТПВК}}$  – фокусные расстояния телевизионного и тепловизионного каналов.

Каждый пиксель тепловизионного канала представляется четырьмя пикселями (2×2) экрана микродисплея (рис. 22).

При переключении электронного увеличения МОЭП, пиксели каждого из каналов увеличиваются согласно заданному увеличению, сохраняя исходную пропорцию элементарных полей каналов.

Такой метод позволяет более гармонично сбалансировать поля зрения и дальности действия каналов, а также обеспечить единый масштаб изображения.

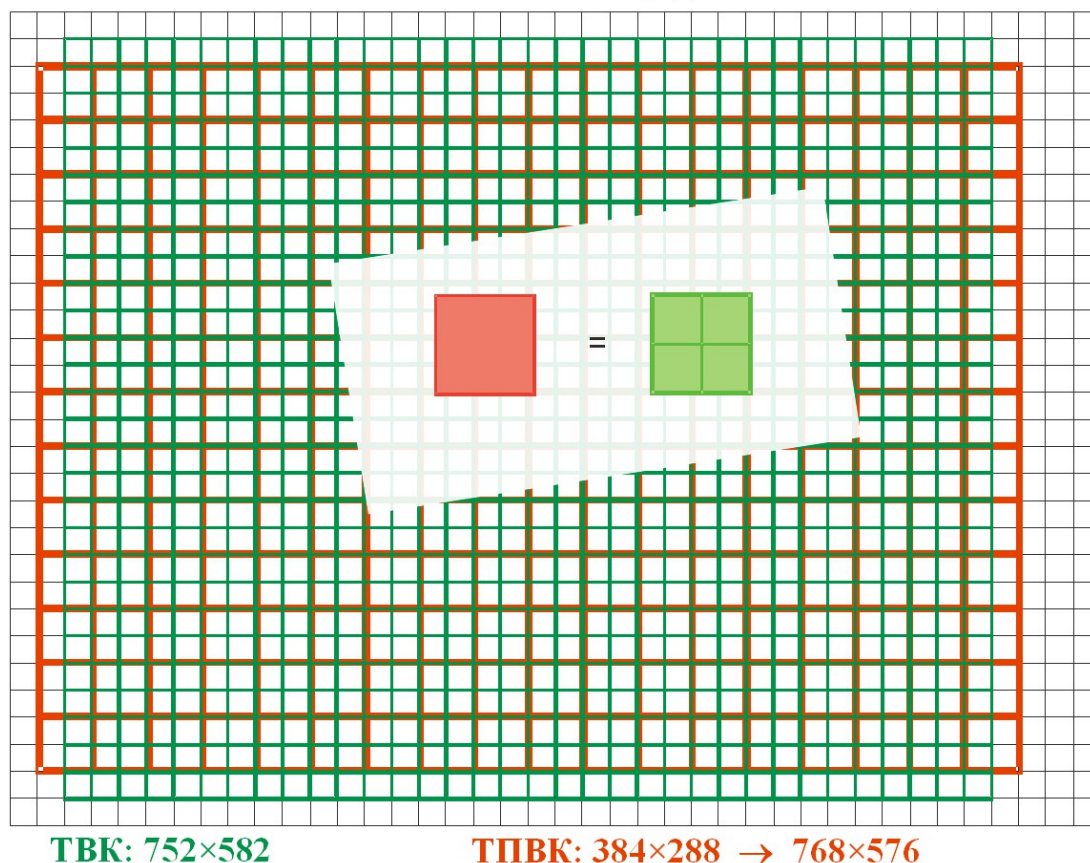


Рисунок 22 – Наложение изображений каналов с выровненными кратными элементарными полями

Вопрос полей зрения достаточно очевиден из пропорций форматов матриц, а вот дальности действия требуют дополнительного рассмотрения.

Тепловизионное изображение, в силу яркого свечения интересующих активных объектов, для распознавания ростовой фигуры или транспортного средства легко обходится 5-6 строками изображения, в то время как для телевизионных изображений требуется не менее 4 пар штрихов, согласно критерию Джонсона [33]. При этом, будут ли 4 пары штрихов в достаточной мере обеспечены 8 строками изображения (минимальное количество согласно критерию Найквиста), зависит от характеристик оптической системы, естественной окружающей освещенности и контраста цели и фона. Камуфлированная цель на фоне хвойного леса способна сократить дальность распознавания (а, соответственно, ужесточить пространственный критерий распознавания) на полпорядка при достаточной освещенности.



При решении задачи обнаружения пропорция еще более драматичная. Там, где тепловизионному каналу бывает достаточно и одного яркого пикселя, дальность обнаружения ночного или телевизионного канала может соответствовать дальности распознавания.

Таким образом, двукратная разница в пространственном разрешении тепловизионного и телевизионного визирных каналов представляется вполне обоснованной и с точки зрения соответствия дальностей действия.

В настоящее время, рост форматов фотоприемных матриц опережает рост форматов микродисплеев. Для 2014 года высокочувствительные телевизионные матрицы ПЗС обеспечивают при частоте 20–30 Гц форматы 1280×960 и 1932×1452. Максимальный формат тепловизионных матриц 1024×768 уже близок к максимальному формату микродисплея 1280×1024.

Разработанный метод будет уместен и для больших форматов матриц. Соответствующий набор электронных увеличений  $1^x$  (ТПВК  $2^x$ / ТВК  $1^x$ ) / ... /  $N^x$  (ТПВК  $2 \times N^x$ / ТВК  $N^x$ ) прибора, для больших форматов, должен быть дополнен еще одним увеличением, составляющим  $0,5^x$  для ТВ канала и  $1^x$  для ТПВ канала:  $1^x$  (ТПВК  $1^x$ / ТВК  $0,5^x$ ) /  $2^x$  (ТПВК  $2^x$ / ТВК  $1^x$ ) / ... /  $N^x$  (ТПВК  $N^x$ / ТВК  $0,5 \times N^x$ ).

### ГЛАВА 3 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО МАСШТАБА ИЗОБРАЖЕНИЙ КАНАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ПРОИЗВОДСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Метод организации общего информационного поля с единым изображением двух каналов исследовался на макетном образце (рис. 23), разработанном в Филиале ИФП СО РАН "КТИПМ" в ходе выполнения НИР «Исследование принципов и путей создания перспективных оптико-электронных приборов наблюдения» (шифр "Засада") и договора поставки с ФГУП «ГосНИИПП», г. Санкт-Петербург в 2009 г.



Рисунок 23 – Макетный образец МОЭП с тепловизионным и лазерным  
локационным каналами

Прибор содержит тепловизионный (ТПВК) и лазерный локационный (ЛЛК) каналы, позволяющие дозорным группам обнаруживать нарушителей границы, возможные засады и другие проявления нежелательной активности на маршруте до приближения на дальность эффективного поражения стрелковым оружием в

любое время суток. Назначение ТПВК – обнаружение живых объектов и транспортных средств по тепловым сигнатурам. Задачей ЛЛК является обнаружение оптических приборов наблюдения и прицеливания по бликам ретро-отраженного зондирующего излучения. Совмещенное изображение каналов выводится на псевдобинокулярный микромонитор.

Неохлаждаемый тепловизионный канал разработан на микроболометрической матрице (МБМ)  $384 \times 288$  с шагом 35 мкм, работающей в спектральном диапазоне 8–12 мкм. Микроболометрические матрицы с шагом 25 мкм, позволяющие снизить массу объектива примерно вдвое при той же дальности действия, на момент разработки были еще не доступны.

Лазерный локационный канал является модификацией активно-импульсного прибора наблюдения, предназначенной для круглосуточного обнаружения оптических средств на дальности действительной стрельбы стрелкового оружия. В активном режиме ЛЛК решает задачу обнаружения оптико-электронных приборов, а в пассивном – дает усиленное ЭОПом телевизионное изображение объектов наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Лазерная фара производит зондирование пространства на невидимой невооруженному глазу длине волны 0,8–0,85 мкм. Оптика, попадающая в зондируемую зону, дает отклик (за счет ретро-отражения от прицельных сеток и фотоприемников), который ярко наблюдается на естественном фоне. Яркость наблюдаемого в изображении ретро-отклика полностью определяется зондирующей подсветкой, а яркость фона в дневных условиях – естественной освещенностью. Приемный тракт ЛЛ канала реализован на базе ЭОП поколения 2<sup>+</sup> и телевизионной ПЗС-матрицы формата  $752 \times 582$  (линейный размер пикселя  $8,6 \times 8,3$  мкм). Связь экрана ЭОПа с ПЗС-матрицей осуществляется через проекционную систему с линейным увеличением  $-0,45^x$  и относительным отверстием в пространстве изображения 1:1.5.

Для вывода изображения использован псевдобинокулярный микромонитор на двух цветных матрицах органических диодов формата  $800 \times 600$  элементов (шаг

15×15 мкм), снабженных окулярами. При этом каждый канал представлен отдельным цветом, который может задаваться оператором (красный, зеленый, синий), что практически исключает взаимные помехи каналов друг другу. Общая и относительная яркости каналов регулируются. Когда нет необходимости наблюдения двух каналов одновременно, или при поиске малоконтрастных объектов, изображение в каналах может быть представлено и в черно-белой палитре, в которой различимо больше оттенков.

Электронно-оптические увеличения каналов подобраны так, что пиксель ЛЛК соответствует пикселю микродисплея, а каждый пиксель ТПВК соответствует двум пикселям микродисплея по вертикали и, номинально, двум пикселям по горизонтали. В результате, локационное/телевизионное изображение занимает центральную часть дисплея из 756×582 элементов, а тепловое – центральную часть из 768×576 элементов. Оставшиеся 18 строк микродисплея, не занятые изображениями ТПВК и ЛЛК, используются для вывода цифро-алфавитной информации о режимах работы каналов и заряде аккумулятора.

На рис. 24 показаны оптические схемы приемных блоков ТПВК и ЛЛК. Условием соблюдения одинакового масштаба каналов является пропорция размеров элементарных полей зрения  $\alpha$  микроболометрической матрицы ( $\alpha_{\text{ТПВК}}$ ) и матрицы ПЗС ( $\alpha_{\text{ЛЛК}}$ ) по вертикали:  $\alpha_{\text{ТПВК}} = 2 \cdot \alpha_{\text{ЛЛК}}$ , что обеспечивается соответствующей пропорцией фокусных расстояний  $f'_{\text{ТПВК}}$  и  $f'_{\text{ЛЛК}}$  приемных объективов ТПВК и ЛЛК с учетом линейного увеличения проекционной системы ЛЛК:

$$\alpha_{\text{МБМ}} / f'_{\text{ТПВК}} = \beta_{\text{ЭОП-ПЗС}} (\alpha_{\text{ПЗС}} / f'_{\text{ЛЛК}})$$

здесь  $\alpha_{\text{МБМ}}$  и  $\alpha_{\text{ПЗС}}$  – вертикальный размер пикселей микроболометрической и ПЗС-матриц,  $\beta_{\text{ЭОП-ПЗС}}$  – линейное увеличение проекционной системы ЛЛК.

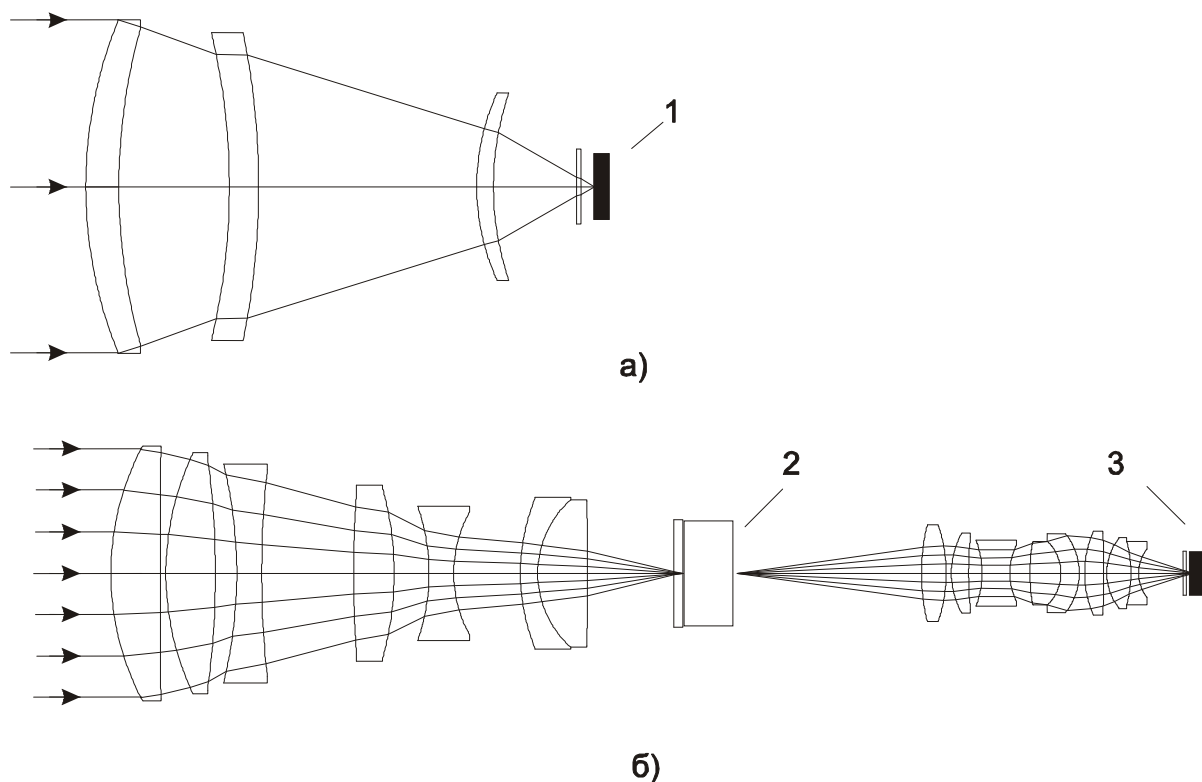


Рисунок 24 – Оптическая схема приемных блоков ТПК (а) и ЛЛК (б)

1 – микрометрическая матрица, 2 – ЭОП, 3 – матрица ПЗС

Поскольку ТПК имеет вдвое меньший формат, именно он определяет конкретное значение элементарного поля из соображений баланса дальности действия и поля зрения с округлением к ближайшему значению доли угла в тысячных или миллирадианах (для устранения проблем с отрисовкой угловых шкал на экране). В макетном образце фокусное расстояние объектива ТПК составило 80 мм, что, при шаге микрометрической матрицы 35 мкм, обеспечивает элементарное поле 0,5 тысячных (0–50) и дальность распознавания ростовой фигуры 500 м, при поле зрения канала  $7,0^\circ \times 9,6^\circ$ .

Для получения телевизионного изображения с экрана электронно-оптического преобразователя  $\varnothing 17,5$  мм, необходима проекционная система с увеличением, обеспечивающим вписывание диагонали фотоприемной матрицы в изображение экрана ЭОПа в плоскости матрицы. Требуемое увеличение для полудюймовой ПЗС  $582 \times 752$  с диагональю 8 мм составляет  $-0,45^\times$ . Его и следует подставить при определении пропорций фокусных расстояний приемных

объективов. Полученное в результате фокусное расстояние приемного объектива ЛЛК составит 85 мм.

Таким образом, полученные значения фокусных расстояний объективов ТПВК, ЛЛК и увеличения проекционной системы ЛЛК обеспечивают равный масштаб изображения по вертикали.

### 3.1 Проблема анизотропии лазерного локационного канала

Шаг элементов микроболометрической матрицы по вертикали и горизонтали одинаков (35 мкм). А шаг элементов ПЗС-матрицы по вертикали и горизонтали различен (8,6×8,3 мкм). Как следствие, при едином с ТПВК масштабе по вертикали и точном наложении двух горизонтальных пикселей ЛЛК на один пиксель ТПВК, по горизонтали набегает весьма заметная ошибка в 12 пикселей в сторону уменьшения масштаба ЛЛК (рис. 25).

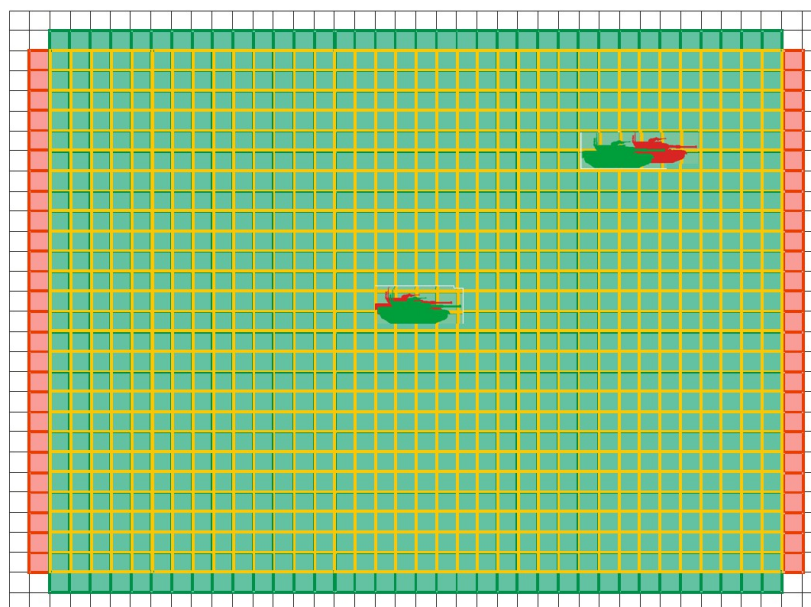


Рисунок 25 – Влияние анизотропии увеличения одного из каналов

Это несоответствие устраняется изменением пропорции пикселей по горизонтали с 1 : 2 на 17 : 33. Технически, такая пропорция достигается за счет того, что в операции слияния изображений во fusion-процессоре каждый столбец тепловизионного канала с номером, кратным семнадцати, соответствует не двум, как все остальные, а одному столбцу телевизионного канала. Эта величина может регулироваться, что позволяет компенсировать технологические ошибки

изготовления и разницу в температурных зависимостях фокусных расстояний объективов каналов.

В результате использования решений по обеспечению равного масштаба изображений двух каналов по вертикали и горизонтали, энергопотребление fusion-процессора, разработанного в Филиале ИФП СО РАН на парадигме реконфигурируемых систем [38, 39], осуществляющего слияние изображений в едином информационном поле, составило 0,5 Вт (при общем энергопотреблении прибора от 6 до 8 Вт – в зависимости от выбранного режима работы).

### 3.2 Регулировка увеличения проекционной системы

Следующая проблема в обеспечении единого масштаба изображений каналов – неизбежное отклонение точных значений фокусных расстояний вследствие технологических допусков при изготовлении оптических деталей.

Еще один источник отклонения фокусных расстояний, уже в процессе эксплуатации, представляет температура окружающей среды, в пределах рабочего температурного диапазона, поскольку тепловизионная оптика имеет на порядок большую температурную зависимость показателя преломления по сравнению с оптикой видимого диапазона.

Небольшие отклонения фокусных расстояний повлекут несовпадение изображений объектов на краю поля зрения. Пример показан на рис. 26.

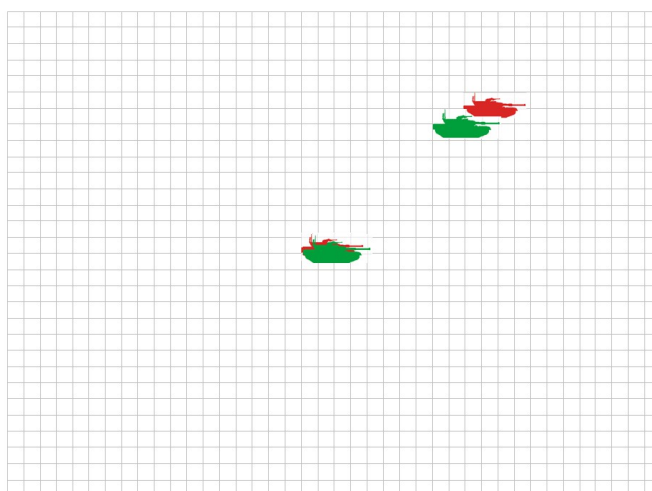


Рисунок 26 – Иллюстрация проблемы расхождения масштабов из-за технологических допусков изготовления оптических компонентов

Для компенсации указанных источников отклонений масштаба, в оптической схеме МОЭП следует предусмотреть регулируемый компенсатор увеличения.

В тепловизионном объективе такой компенсатор крайне нежелателен из-за низкого коэффициента светопропускания линзовых компонентов, вследствие высокого показателя преломления германия и прочих материалов. Тепловизионный канал реализован всего на трех линзах, что, несомненно, является достижением. Лишние компоненты повлекут потерю светового потока с соответствующими следствиями в дальности действия.

Приемный объектив ЛЛК, нагруженный задачей коррекции хроматических aberrаций в широком спектральном диапазоне, также трогать нежелательно.

Таким образом, в макетном образце МОЭП роль корректора возложена на проекционную систему, для которой, на этапе абберационного расчета, предусмотрены регулировки масштаба в пределах 10% без потери качества изображения.

### **3.3 Проблема дисторсии объективов**

Масштаб изображений каналов искажается также дисторсиями объективов и проекционной системы. Предельно допустимые значения дисторсий следует ограничить на этапе абберационного расчета систем. По результатам расчетов (программное обеспечение Zemax), для объектива ТПВК и проекционной системы ЛЛК она составила менее 0,2%, а для объектива ЛЛК – менее 0,5% (рис. 27), причем, что важно, для всех объективов дисторсия имеет один знак (отрицательная). Бóльшая величина дисторсии объектива ЛЛК обусловлена жесткими требованиями к исправлению его хроматизма в широком спектральном диапазоне (0,43–0,88 мкм). Тем не менее, максимальное результирующее отклонение не превышает размера элемента ТПВК (2×2 пикселя) на дисплее.



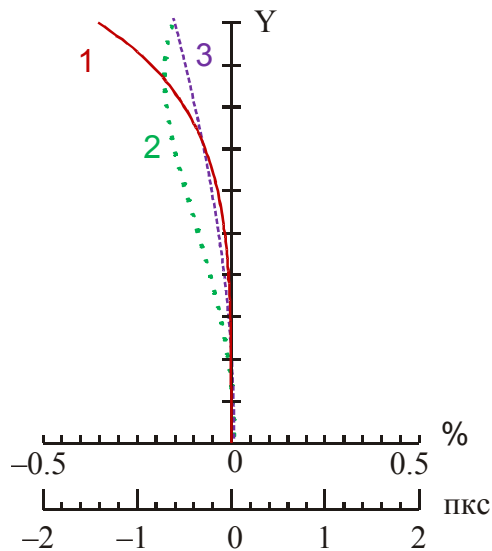


Рисунок 27 – Графики дисторсии оптических систем каналов в процентах и пикселях. 1 – объектив ЛЛК, 2 – проекционная система ЛЛК, 3 – ТПВК

### 3.4 Выравнивание осей каналов и проблема параллакса каналов

Между изображениями двух каналов с отдельными входными зрачками неизбежно возникает параллакс (рис. 28). Попытки устранения параллакса за счет комбинации входных зрачков на общей оси, описанные в многочисленных публикациях и патентах, влекут перераспределение проблемы в аберрации объективов и потери светового потока с существенным ростом массогабаритных характеристик.

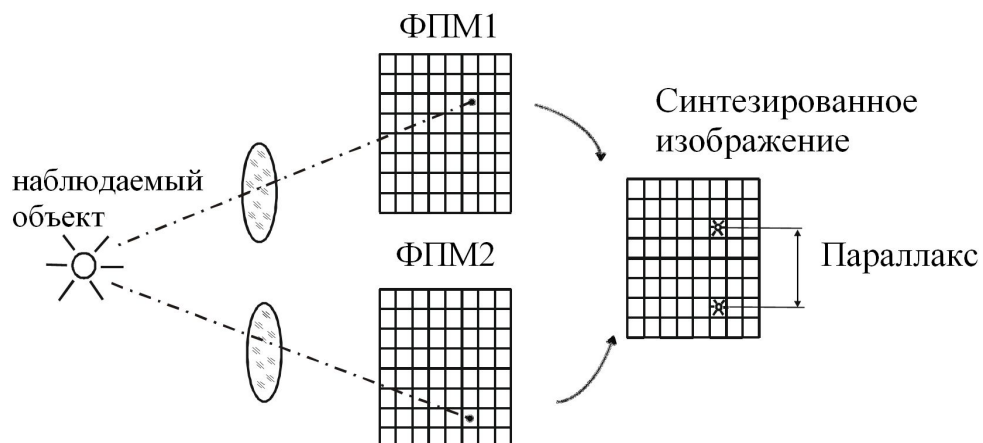


Рисунок 28 – Параллакс изображений каналов с отдельными входными зрачками

Например, в [40] проблема параллакса решается за счет размещения объектива тепловизионного канала в отверстии объектива канала ночного

видения (рис. 29). Такое решение «обменивает» параллакс между каналами на параллакс пучков излучения, проходящих через внешний зрачок, проявляющийся, в конечном счете, в ограничении глубины резко изображаемого пространства канала, работающего через внешний зрачок.

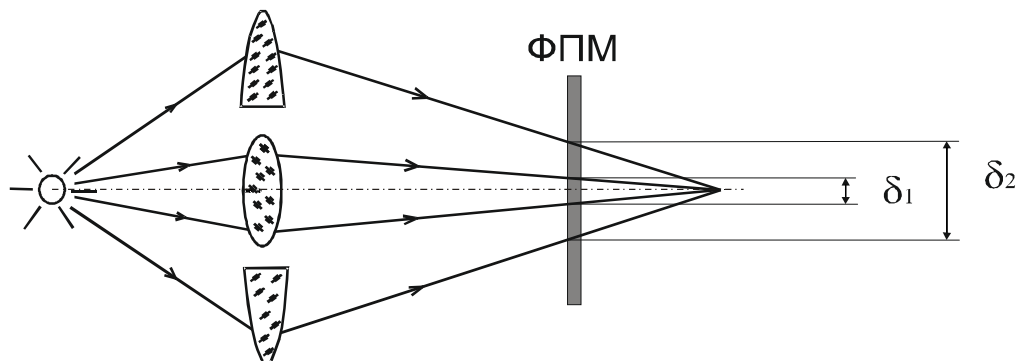


Рисунок 29 – Ограничение глубины резко отображаемого пространства во "внешнем" объективе прибора с комбинированным входным зрачком

Дальность обнаружения точечного объекта, расфокусированного вследствие «промаха» по дальности фокусировки, резко падает. Ограниченная глубина резко изображаемого пространства затрудняет и работу, и юстировку канала в большей степени, чем параллакс, поскольку параллакс проявляется только по одной координате и при работе или юстировке по удаленному объекту может быть скорректирован расчетно.

Альтернативный вариант – использование во входном зрачке дихроичного светоделителя – потребует выделения в корпусе объема не меньшего, чем объектив тепловизионного канала, и повлечет потери светопропускания на защитном стекле и фильтре.

Поэтому все серийно производимые МОЭП (Глава 1 диссертации) имеют отдельные входные зрачки каналов.

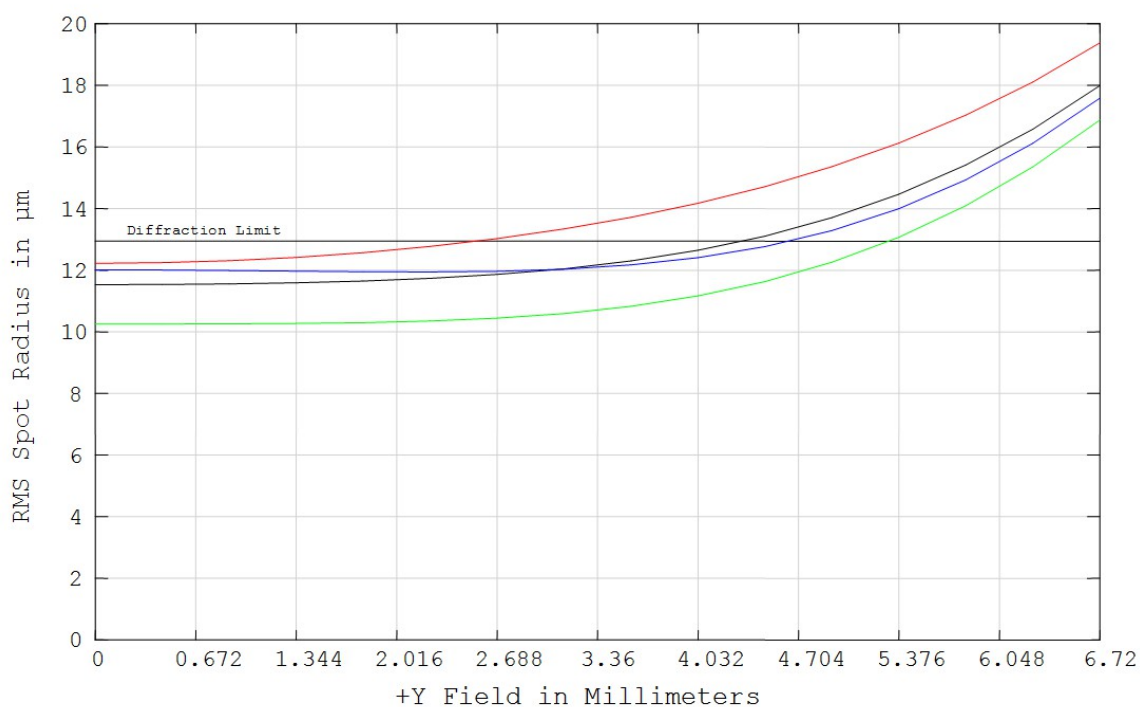
В макетном образце при расстоянии между зрачками линзовых объективов порядка 100 мм наблюдаемый параллакс, на дистанциях от 200 м и более, не превышает угловой размер элемента ТПВК, что вполне допустимо. В условиях наблюдения на близкие дистанции параллакс может корректироваться электронной регулировкой под конкретную дальность, задаваемую в меню

настроек. Данная возможность ни разу не была востребована в процессе испытаний.

Согласование осей каналов в процессе сборки обеспечивалось механическими подвижками фотоприемных матриц с последующей точной электронной подстройкой положения каналов на экране дисплея.

### 3.5 Результаты расчета объектива телевизионного канала

Объектив тепловизионного канала макетного образца МОЭП содержит три сферические линзы из германия и селенида цинка (рис. 24а) и обеспечивает дифракционное качество на оси, при относительном отверстии 1:1 и дисторсии, ограниченной в заданных пределах (рис. 27). Диаметр пятна рассеяния точки по полю зрения не превосходит шаг пикселей микроболометрической матрицы 35 мкм (рис. 30, Zemax).



RMS Spot Radius vs Field			
Thermo Channel	F=80 / F#=1	KTI	TPD
21.04.2022			
Poly	8.5	10.6	12
Reference: Centroid	F80 FN10 Detail.ZMX Configuration 1 of 1		

Рисунок 30 – Среднеквадратичный радиус пятна рассеивания точки (RMS) объектива ТПВК, мкм

Таким образом, объектив ТПВК удовлетворяет дополнительным требованиям по единому масштабу изображения без какого-либо ухудшения качества и дополнительных линз.

### 3.6 Результаты расчета проекционной системы

Изображение с экрана ЭОПа переносится на фотоприемную ПЗС-матрицу через специально спроектированную проекционную систему. Увеличение системы определяется необходимостью вписать диагональ фотоприемной матрицы 8 мм в изображение экрана ЭОПа 17,5 мм в плоскости матрицы и составляет  $-0,45^{\times}$ .

Спроектированная проекционная система, учитывающая требования увеличения, возможности регулировки увеличения в пределах 10%, ограничения дисторсии и высокого относительного отверстия, получилась достаточно сложной – 7 компонентов из 8 линз (рис. 24б), но полностью обеспечивает пространственное разрешение, не ухудшающее итоговое разрешение ЛЛК.

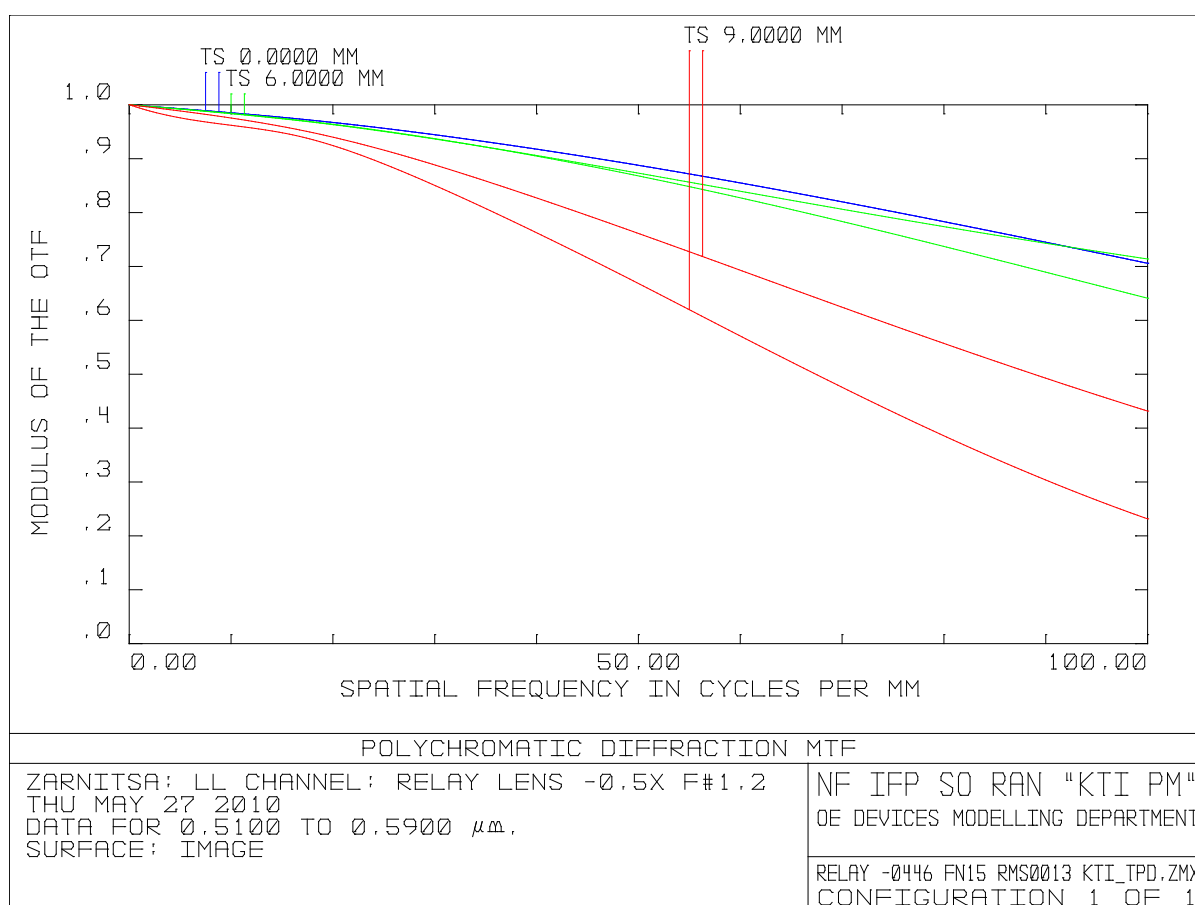


Рисунок 31 – Функция передачи модуляции проекционной системы

Расчетное пространственное разрешение (рис. 31) при ФПМ = 0,5 составляет  $67 \text{ мм}^{-1}$  по краю поля зрения и  $150 \text{ мм}^{-1}$  по центру. Из графика видно, что проекционная система, с учетом увеличения  $0,446^x$ , существенно превышает пространственное разрешение ЭОПа ( $15 \text{ мм}^{-1}$ ). В общем пространственном разрешении ЛЛК наиболее критичным элементом является фотоприемная матрица с шагом 8 мкм.

Из графика среднеквадратичного радиуса оптического пятна (рис. 32) видно, что диаметр оптического пятна составляет по полю 3–6 мкм и не превышает шага элементов матрицы ПЗС 8 мкм.

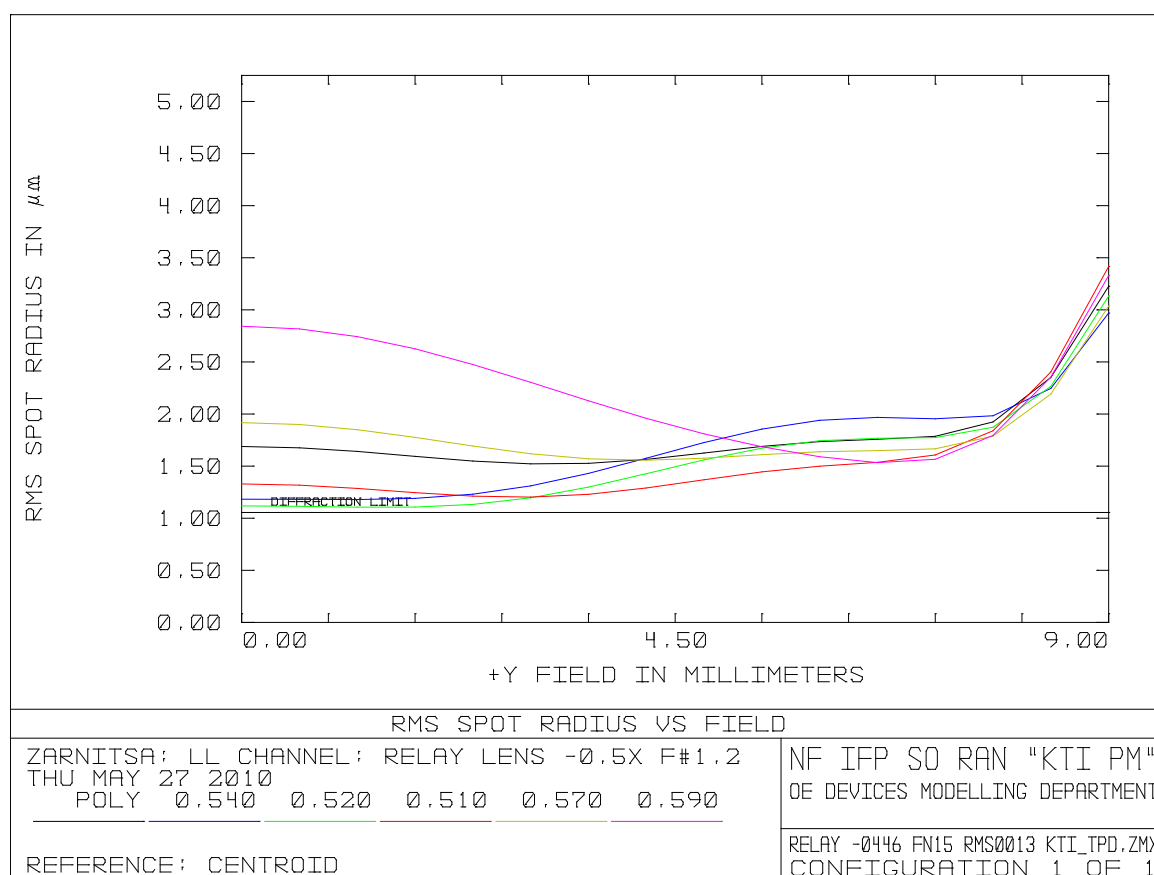


Рисунок 32 – Среднеквадратичный радиус оптического пятна по полю зрения проекционной системы

Таким образом, абберационный расчет проекционной системы демонстрирует реализуемость предъявленных требований и работоспособность метода обеспечения единого масштаба изображения в условиях производства и эксплуатации.

### 3.7 Наложение изображений в процессоре

Синтез изображений ТПВК и ЛЛК в совмещенное изображение производится во fusion-процессоре, разработанном в Филиале ИФП СО РАН на парадигме реконфигурируемых систем (*англ.* High Performance Reconfigurable Calculations, HPRC) Г.Е. Журовым [38, 39]. Fusion-процессор реализован на программно-аппаратной платформе Сигнальный процессор + ПЛИС (DSP-FPGA) [41]. Его внешний вид представлен на рис. 33.



Рисунок 33 – Процессор изображений Журова Г.Е.,  
разработанный на парадигме HPRC

Энергопотребление процессора составляет 0,5 Вт. Процессор работает под управлением операционной системы реального времени вытесняющего типа для микроконтроллеров scmRTOS [42], также разработанной Г.Е. Журовым. Оба канала имеют аппаратно идентичные собственные процессоры изображений, при этом функция fusion-процессора, необходимого непосредственно для слияния изображений, осуществляется в процессоре ЛЛК.

Подобный подход оказался оправданным и дальнейшем был неоднократно применен при построении тепловизионных приборов наблюдения [43, 44] и приборов видимого спектрального диапазона [45, 46].

Внешний вид комплекта плат, обеспечивающих работу ТПВ представлен на рис. 34.

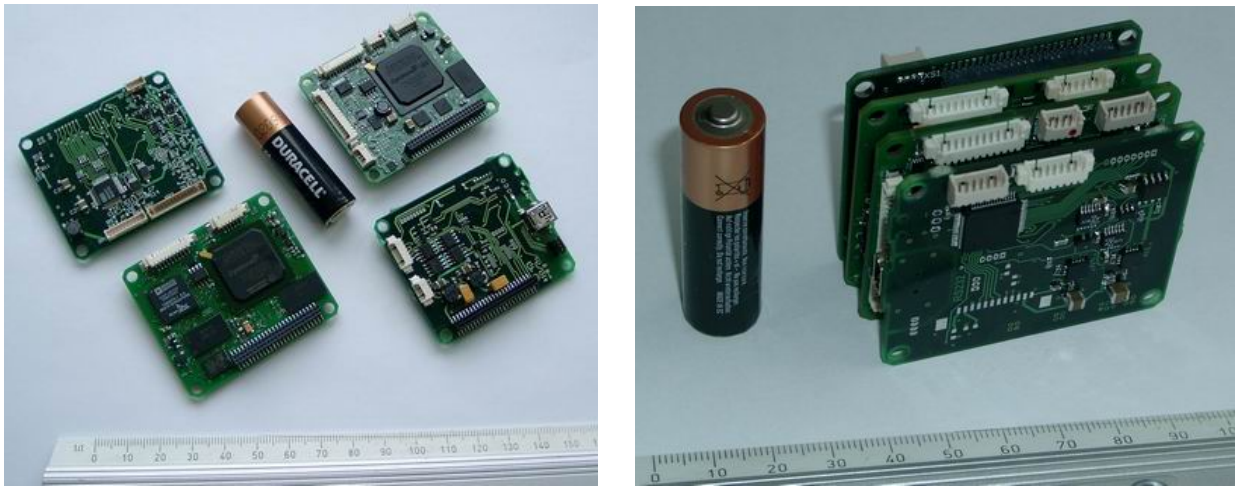


Рисунок 34 – Комплект плат ТТВ канала по отдельности и в сборке. Процессор изображений – вверху справа на левом фото. Батарейка для масштаба.

Помимо задач обработки изображений процессор осуществляет управление каналами, интерфейс с двумя джойстиками и шестью кнопками управления прибором, синтез цифро-алфавитной служебной информации и взаимодействие с Ethernet каналом передачи данных на внешний компьютер (рис. 35).

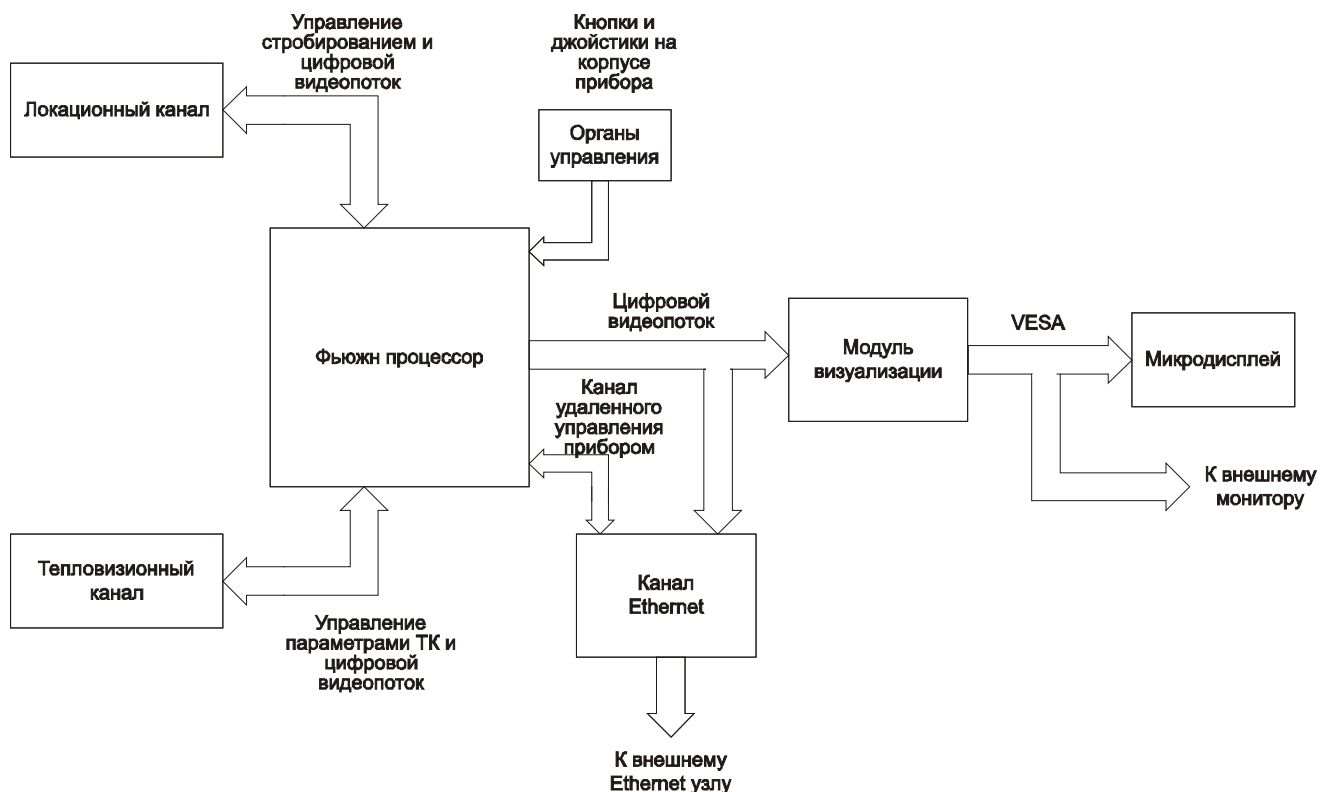


Рисунок 35 – Функциональная схема управления и передачи данных в МОЭП

Изображения в едином масштабе выводятся на цветной псевдобинокулярный микромонитор (рис. 36) на базе двух микродисплеев



(матрицы органических светодиодов  $800 \times 600$  элементов), снабженных оптической системой типа «виртуальный сферический экран» [47–49], разработанной Ковалевым А.М.



Рисунок 36 – Псевдобинокулярный микромонитор макетного образца МОЭП

Кроме изображения, получаемого с визирных каналов, на монитор также выводится служебная информация, отображающая в процессе работы режимы каналов, а в процессе настройки – вспомогательную информацию, позволяющую осуществить тонкую выверку каналов по вертикали и горизонтали, дополнительную регулировку горизонтального масштаба ТВК, калибровку измеряемой дальности, цветовую палитру и относительные яркости каждого из каналов. Микродисплей на двух матрицах является достаточно энергозатратным блоком (потребление 2 Вт), что, однако, компенсируется высокой яркостью изображения, которую не приходится делить на два глаза, и малой массой.

На рис. 37 и 38 приведены примеры получаемых изображений. Изображение ТПВК представлено тонами красного цвета, изображение ЛЛК – тонами зеленого. В поле зрения ТПВК достаточно хорошо просматриваются рельеф и тепловые детали ландшафта местности, но совершенно не заметен замаскированный оптический прибор наблюдения. В поле зрения ЛЛК отчетливо виден яркий блик от замаскированного прибора при слабом контрасте деталей ландшафта. В совмещенном изображении хорошо видны и элементы ландшафта, и сигнатура обнаруженного оптического прибора (яркое зеленое пятно).



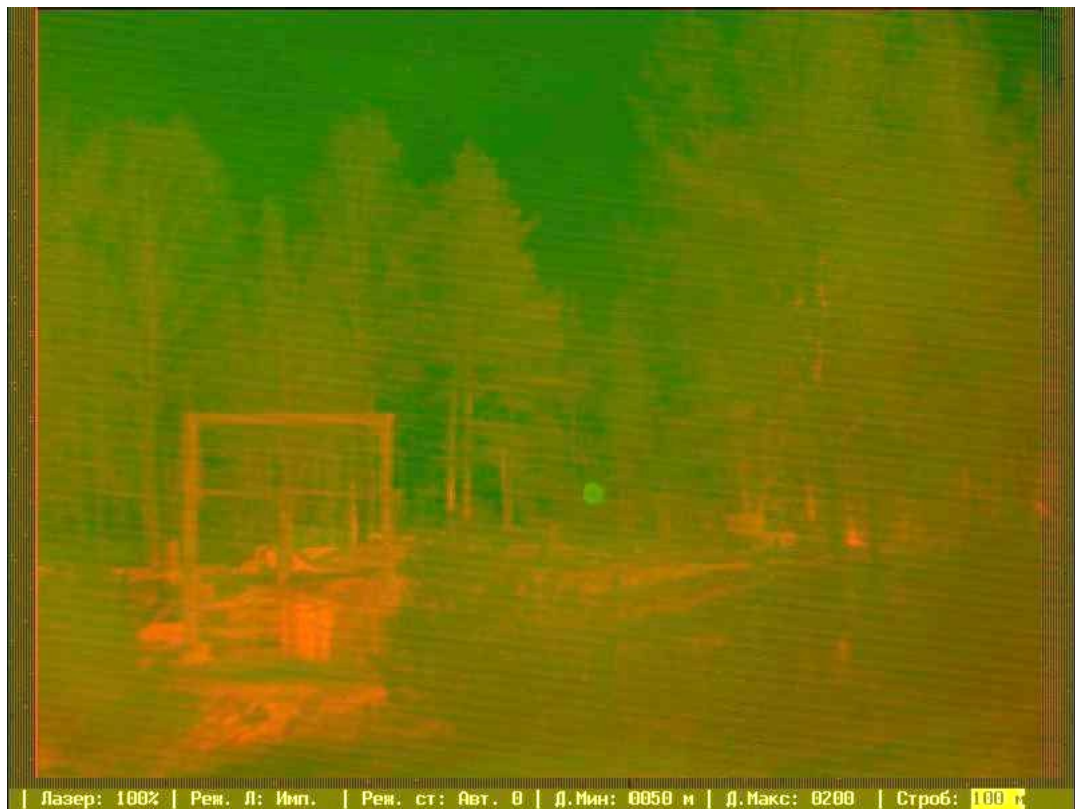


Рисунок 37 – Пример совмещенного изображения: ландшафт и отклик оптического прибора



Рисунок 38 – Пример совмещенного изображения: автомобиль и отклик оптического прибора над автомобилем

Изображение может также выводиться на внешний стандартный дисплей, имеющий вход VESA SVGA, и на внешний компьютер через интерфейс Ethernet. Соответствующие разъемы размещены в нижней части таким образом, что они не препятствуют горизонтальному расположению прибора на плоской поверхности при подключении внешних устройств.

Общая масса прибора с аккумулятором составляет 5 кг. Штатное рабочее положение – на треноге. Общее энергопотребление составило примерно 8 Вт. Штатного аккумулятора 7 В, 4 Ач, весом 180 г хватает приблизительно на 3,5 часа непрерывной работы.

Рукоятки прибора снабжены кнопками управления, а также джойстиком в районе расположения больших пальцев (рис. 39).



Рисунок 39 – Работа оператора с макетным образцом МОЭП

Разработка и исследования макета продемонстрировали реализуемость предложенных методов выравнивания масштабов и организации единого информационного поля МОЭП без потерь в характеристиках назначения каналов и при разумном энергопотреблении.

## ГЛАВА 4 МЕТОД РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВА СУПЕРАПОХРОМАТА ЛАЗЕРНОГО ЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА

Для решения задачи отображения четкого точечного отклика бликующей цели в интервале длин волн 0,83–0,85 мкм через оптическую систему, которую оператор может фокусировать, наблюдая обстановку преимущественно в видимом диапазоне спектра, был разработан специальный широкоспектральный линзовый объектив-суперапохромат, исправленный в отношении хроматизма положения для четырех длин волн.

Для обеспечения вторичной задачи – работы в режиме пассивного низкоуровневого ТВ канала – объектив также должен максимально использовать спектральный диапазон ЭОПа (поколения 2+ с фотокатодом S25, на рис. 40 кривая 7) 0,43–0,88 мкм.

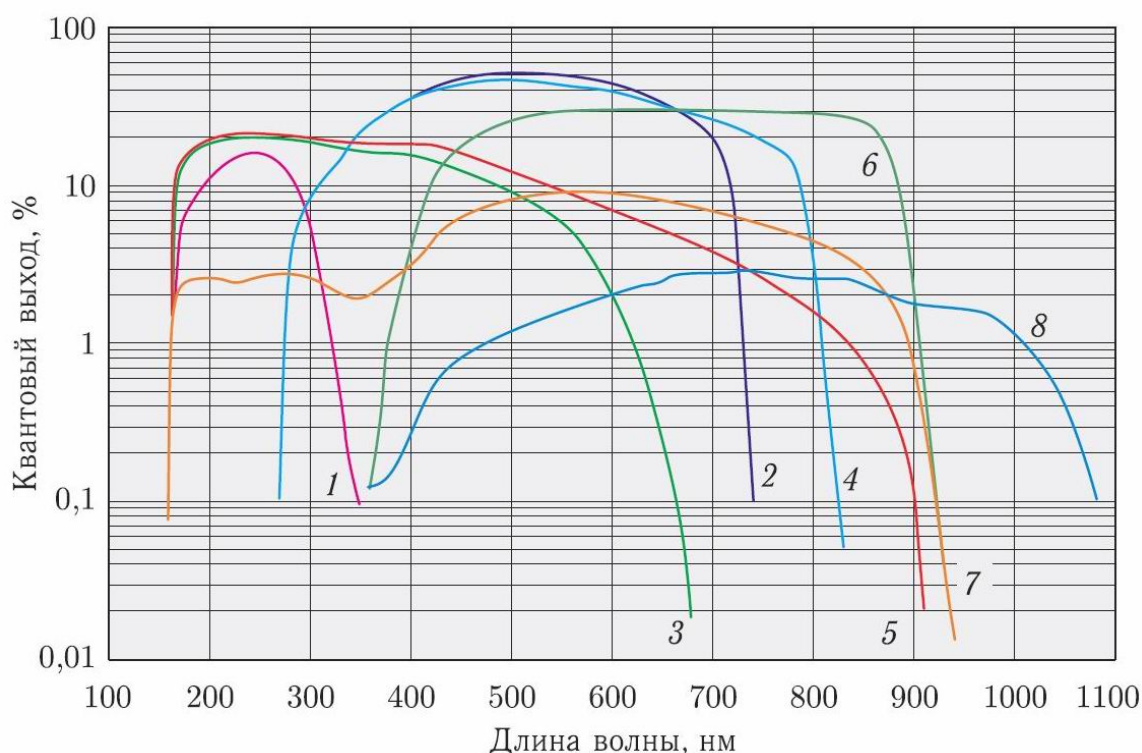


Рисунок 40 – Спектральные характеристики основных типов фотокатодов ЭОП:

- 1 – CsTe; 2 – GaAsP; 3 – SbNa:Cs (двухщелочной); 4 – GaAsP (с продленной чувствительностью в красной области спектра); 5 – Na<sub>2</sub>KSb:Cs (многощелочной); 6 – GaAs:Cs (ОЭС); 7 – Na<sub>2</sub>KSb:Cs (с продленной чувствительностью в красной области спектра); 8 – InGaAs:Cs (ОЭС); [50, с. 81, рис. 2.4]

В серийных отечественных приборах ночного видения, использующих ЭОПы поколения 2+, "лишние" участки спектрального диапазона отрезаются. Обоснования для отрезания "лишнего" потока ссылаются на результат перемножения спектров излучения звезд на спектр отражения растительности, а также на снижение чувствительности фотокатода ЭОПа по краям спектрального диапазона. Например, для ЭОПа поколения 2+, при таком подходе, объектив ахроматизируется в диапазоне 0,6–0,8 мкм. При сомнительности сведения всех рабочих сцен для приборов ночного видения к растительному фону, есть и определенный резон в том, что борьба за увеличение входного потока с помощью расширения спектрального диапазона объектива может привести к снижению этого потока за счет увеличения количества требуемых оптических компонентов.

В случае объектива ЛЛК, однако, сомнения в необходимости полного обеспечения рабочего диапазона ЭОПа отсутствуют, поскольку длинноволновая граница чувствительности фотокатода соответствует длине волны зондирующей фары, а коротковолновая часть спектральной чувствительности вполне обеспечена потоком солнечного излучения, не полностью подавленным сложным комбинированным фильтром.

При ночной освещенности, определяемой фазами Луны, и в сумерках коротковолновая часть спектра также преобладает (рис. 41, кривые 3, 4).

Таким образом, в ЛЛК макета МОЭП ахроматизация в пределах спектральной чувствительности фотокатода S25 имеет смысл и в активном, и в пассивном (низкоуровневом телевизионном) режимах работы.

Для объектива ЛЛК, как и для объективов других ПНВ с относительно небольшим полем зрения и высоким относительным отверстием, в качестве базы оптимально подходит схема объектива Пецваля. Компоненты, используемые в объективах, содержат до 3 линз. Условием обеспечения широкого спектрального диапазона 0,43–0,88 мкм, с достаточным качеством изображения, является исправление хроматизма не менее, чем на 4 длинах волн.

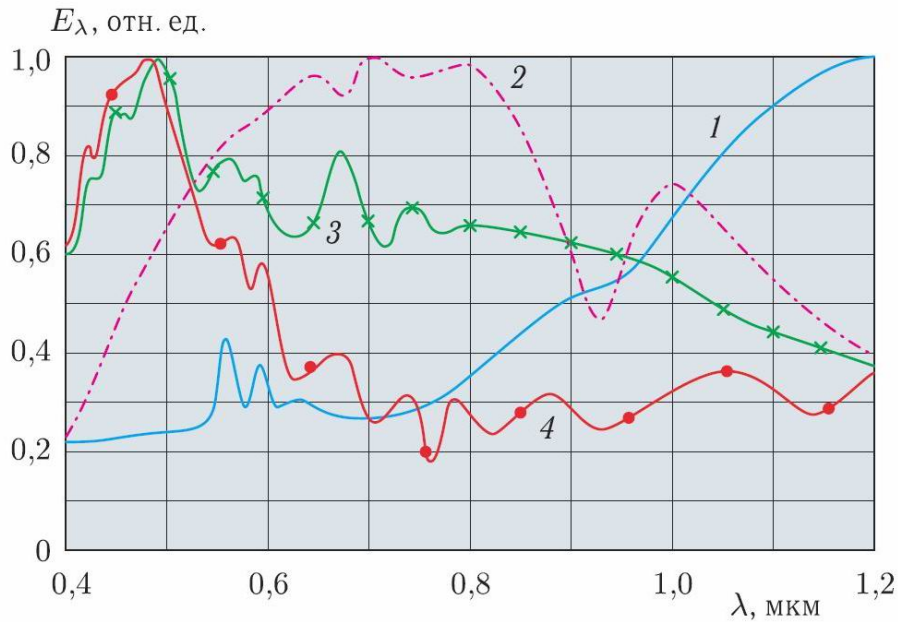


Рисунок 41 – Относительные спектральные характеристики горизонтальной освещенности поверхности Земли: 1 – ночные условия (без Луны), ясно ( $E = 10^{-3}$  лк); 2 – ночные условия (с Луной), сплошная облачность ( $E = 3,65 \cdot 10^{-2}$  лк); 3 – сумерки (без Луны), ясно ( $E = 0,2$  лк); 4 – сумерки (с Луной), сплошная облачность ( $E = 0,2$  лк) [50, с. 54, рис. 1.24.]

Соответствующие объективы именуются суперапохроматами (в русскоязычной литературе), суперахроматами (в англоязычной литературе) или четырехцветными апохроматами. В таких объективах используются тройки стекол, как и в апохроматах, но, за счет использования специальных методов выбора марок стекол, исправление на 4-ой длине волны происходит автоматически при обеспечении условия апохроматизации. Для синтеза таких объективов составляется система из 4 уравнений с тремя неизвестными оптическими силами отдельных тонких линз:

$$\begin{cases} \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = \varphi_{\text{общ}} \\ \frac{\phi_1}{\nu_1} + \frac{\phi_2}{\nu_2} + \frac{\phi_{31}}{\nu_3} = 0 \\ \frac{\phi_1}{\nu_1} p_1 + \frac{\phi_2}{\nu_2} p_2 + \frac{\phi_{31}}{\nu_3} p_3 = 0 \\ \frac{\phi_1}{\nu_1} p'_1 + \frac{\phi_2}{\nu_2} p'_2 + \frac{\phi_{31}}{\nu_3} p'_3 = 0 \end{cases}$$

где  $\phi_i$  – оптическая сила  $i$ -й линзы,  $v_i$  – число Аббе  $i$ -й линзы,  $p_i$  – частная дисперсия на третьей корректируемой длине волны,  $p'_i$  – частная дисперсия на четвертой корректируемой длине волны.

Первое уравнение задает общую оптическую силу тройки тонких линз, имеющих оптическую силу  $\phi_i$ , второе и третье уравнения задают условие апохроматизации на трех длинах волн для стекол, имеющих коэффициент Аббе  $v_i$  и частную дисперсию для третьей корректируемой длины волны  $p_i$ , четвертое уравнение вводит условие исправления хроматизма на четвертой длине волны, для которой частная дисперсия равна  $p'_i$ . Поскольку общего решения системы 4 уравнений с 3 неизвестными не существует, Герцбергер в [51] предложил использование марок стекол, в которых отношения частных дисперсий 3-х стекол на двух длинах волн к коэффициенту Аббе связаны линейной зависимостью. В таком случае, четвертое уравнение становится линейно зависимым от третьего, и ранг системы уравнений понижается до 3-го, имеющего общее решение для 3 неизвестных.

Для отыскания троек стекол, удовлетворяющих условию, Герцбергер построил диаграмму частных дисперсий ряда стекол каталога Schott и кристаллического флюорита  $P_{\lambda_3}$ - $P_{\lambda_4}$ , на которой требуемые тройки должны оказываться на одной прямой. Подобную диаграмму для стекол ГОСТ, составил М.Г. Шпякин [52].

Прямое использование диаграммы Герцбергера, со стеклами, производившимися до 1962 года, затруднительно. Кроме проблем с точностью подбора стекол при помощи линейки, не указанных длин волн для построения диаграммы и соответствия современным маркам стекол, есть еще проблема, заключающаяся в том, что плоская диаграмма не дает представления о разнице в показателях преломления стекол в тройке. Максимальная разница между кроном и флинтom позволяет реализовать решение на линзах меньшей кривизны, что улучшает условия исправления прочих аберраций.



Для расчета объектива ЛЛК соискателем был разработан объемный куб-диаграмма частных дисперсий и показателей преломления  $P_{435}\text{-}P_{900}\text{-}N_D$ , проекции которого отображены на рис. 42 и рис. 43. Куб можно вращать вокруг 3 осей (рис. 44), для формирования представления об области расположения стекол и кристаллов. Для более точного отыскания троек, между координатами  $P_{435}\text{-}P_{900}\text{-}N_D$  двух выбранных марок проводится прямая, к которой выдается список прилегающих к ее проекции в плоскости  $P_{435}\text{-}P_{900}$  (с заданной точностью) марок стекол в формате: марка,  $N_D$ , число Аббе, расстояние до проекции линии.

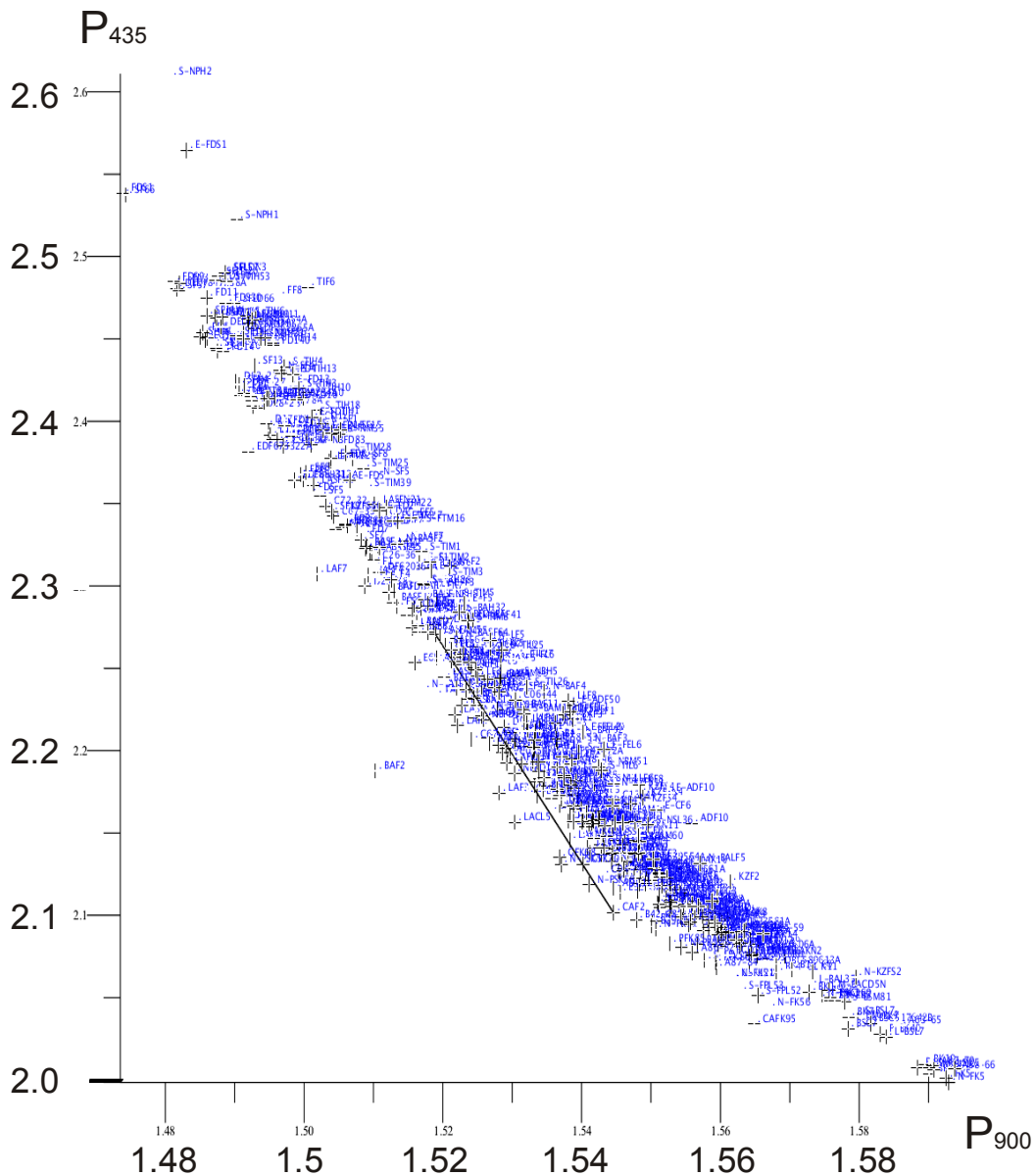


Рисунок 42 – Диаграмма частных дисперсий  $P_{435}$  -  $P_{900}$  массива стекол нескольких производителей и оптических кристаллов для длин волн 435 нм и 900 нм

На рис. 42 видны затруднения с использованием оригинальной диаграммы Герцберга – крайне трудно определить марки стекол со значительной разницей показателей преломления без использования второй проекции (рис. 43) или объемной модели (рис. 44). Линия, соединяющая флюорит CAF2 ( $N_D=1,433$ ) и стекло LASFN15 ( $N_D=1,877$ ), в первой проекции не выглядит предпочтительным выбором.

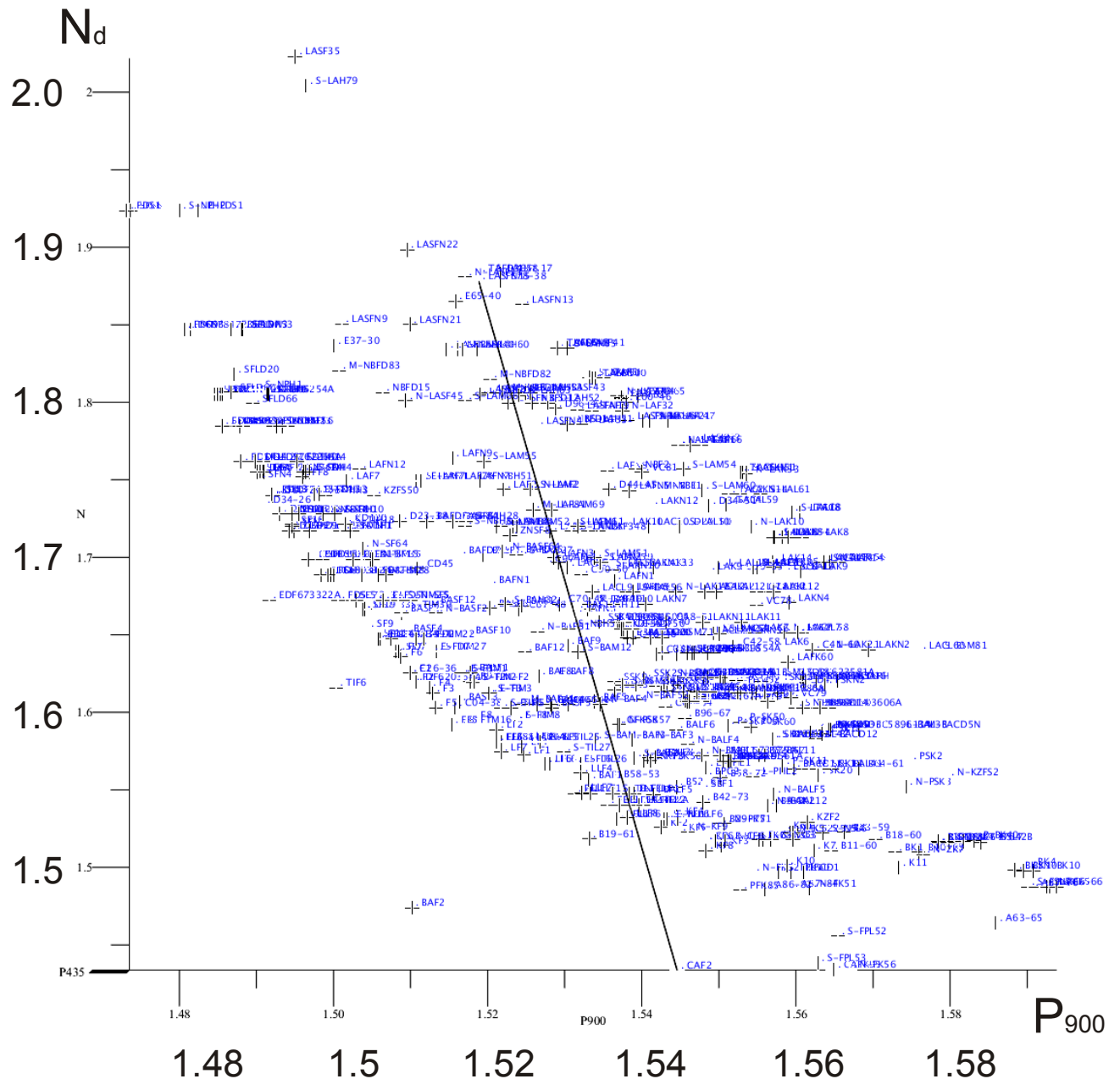


Рисунок 43 – Диаграмма частных дисперсий и показателя преломления  $N_D$  -  $P_{900}$  массива стекол нескольких производителей и оптических кристаллов.





На основе цифрового куба-диаграммы соискателем был рассчитан не только объектив Пецваля для ЛЛК [34–37], но и панкратический широкоспектральный (0,45–0,9 мкм) объектив [53], а также широкоспектральный объектив фиксированного увеличения (0,4–0,9 мкм) для цифрового прицела [54].

Характеристики объектива ЛЛК представлены в таблице 12, а его оптическая схема приведена на рис. 45.

Таблица 12 – Характеристики объектива ЛЛК

Относительное отверстие	1:2
Спектральный диапазон	0,43–0,85 мкм
Фокусное расстояние	85 мм
Среднекв. диаметр пятна	не более 4 мкм
ФПМ на $100 \text{ мм}^{-1}$	0,8 на оси / 0,55 по краю поля зрения

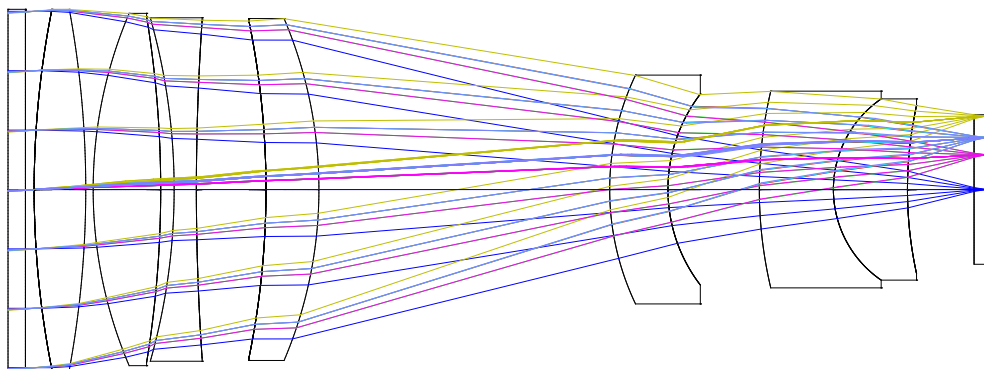


Рисунок 45 – Оптическая схема объектива ЛЛК

Результат исправления хроматизма по доработанному методу Герцберга представлен на рис. 46. Кривая хроматизма положения (рассчитана в программе ZEMAX) демонстрирует совмещение фокальной плоскости для 4 длин волн в спектральном диапазоне 0,43–0,88 мкм, с характерным для суперапохромата w-образным профилем.

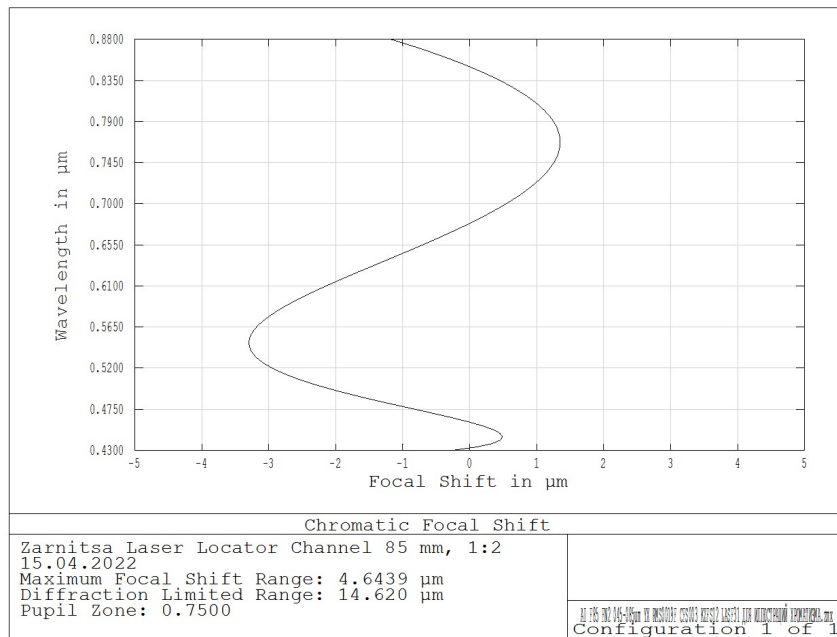


Рисунок 46 – Хроматизм положения объектива ЛЛК  
в спектральном диапазоне 0,43–0,88 мкм

График (рис. 47) среднеквадратичного радиуса пятна рассеяния точки объектива ЛЛК по линейному полю зрения (фотокатоду ЭОП) показывает, что пятно по всему полю не превышает как дифракционного предела разрешения (черная горизонтальная линия) 4 мкм, так и шага микроканальной пластины ЭОП 7 мкм.

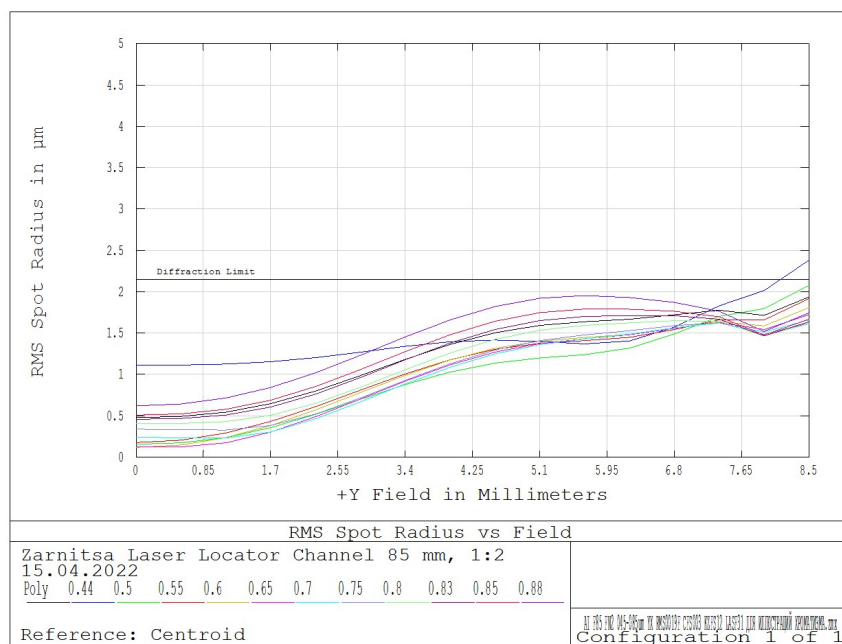


Рисунок 47 – Расчетный среднеквадратичный радиус пятна рассеяния точки объектива ЛЛК по линейному полю зрения (фотокатоду ЭОП), мкм

Следует отметить, что достаточно хороший результат расчета получился и при относительном отверстии 1:1,5, но, в силу специфики работы лазерного канала в дневное время, для повышения отношения сигнал/фон выгодно иметь большой входной зрачок (определяющий поток от точечной цели) при низком относительном отверстии (снижающем поток от фона). В пассивном же режиме в ночное время суток выгодно иметь высокое относительное отверстие. Поэтому относительное отверстие 1:2 имеет компромиссный характер для работы в двух существенно различных режимах.

Функция передачи модуляции (ФПМ) объектива (рис. 48) по всему полю изображения существенно превосходит возможности ЭОПа, для которого производитель гарантирует ФПМ на уровне 0,5 на частоте  $15 \text{ мм}^{-1}$ .

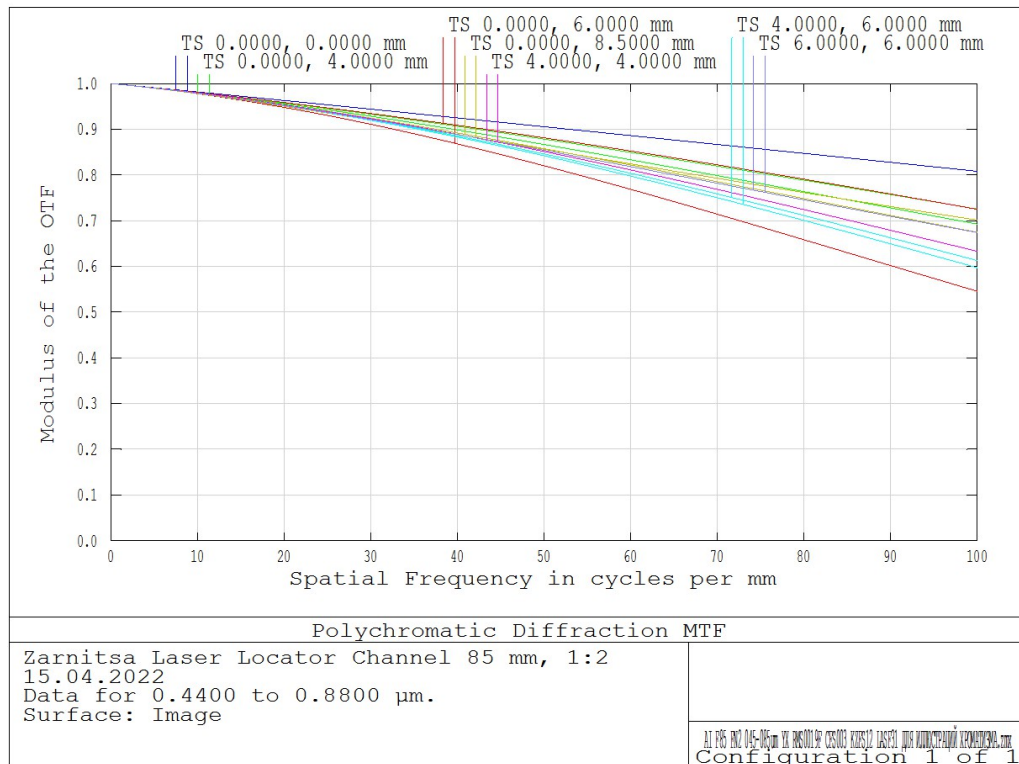


Рисунок 48 – Функция передачи модуляции (ФПМ) объектива ЛЛК по линейному полю зрения (кривые TS для различных координат X, Y в мм)

Таким образом, доработанный метод расчета суперапохромата Герцбергера позволил обеспечить полное использование спектрального диапазона ЭОПа при расчетном качестве изображения ограниченным исключительно шагом микроканалов и дифракцией.

## ГЛАВА 5 МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ЛОКАЦИОННОГО КАНАЛА

Лазерные локаторы оптических систем (ЛЛ) являются относительно новым направлением в оптико-электронных приборах наблюдения и прицеливания. Исторически, ЛЛ происходят от активно-импульсных приборов ночного видения (ПНВ) – результата эволюции приборов ночного видения, использующих инфракрасную фару для повышения дальности видения. Для снижения паразитного отражения от ближних слоев атмосферы и объектов, ослепляющего оператора, АИ ПНВ используют временное стробирование лазерной фары (ЛФ) и электронно-оптического преобразователя (ЭОП) [55–64].

Задержка между стробами лазерной фары и ЭОПа регулируется оператором, что позволяет освещать только определенный промежуток по дистанции наблюдения, исключая прочие дистанции. Современный уровень техники позволяет ограничить длительность временного строба ЭОПа сотней наносекунд, что соответствует пространственной глубине строба дальности в тридцать метров [65].

Вследствие принципиальных недостатков – демаскирующего активного режима работы и крайне узкого поля подсвета (для существенного повышения дальности) порядка одного градуса – АИ ПНВ использовались только в виде дополнительного канала высокого разрешения к тепловизионному каналу, позволяющему обнаруживать цель в относительно широком поле зрения. По мере повышения форматов изображения тепловизионных каналов, применение АИ каналов потеряло смысл. Однако, в настоящее время, для АИ приборов появилась новая ниша применения – обнаружение оптико-электронных средств наблюдения.

В ночное время суток хорошо заметен интенсивный отклик оптических приборов, попадающих в поле подсветки фары или фонаря. Отклик формируется в результате ретроотражения попадающего в объектив излучения. Наиболее значимую долю в ретроотражении обеспечивает прицельная сетка (для визуального прибора) или плоскость фотоприемника (для ОЭП), совмещенная с фокальной плоскостью объектива. Часть отраженного излучения, возвращается

строго в обратном направлении, обеспечивая достаточную интенсивность отклика.

Соискателем была теоретически обнаружена возможность обнаружения оптики и в дневное время суток с использованием модифицированного АИ ПНВ. В дневное время суток отношение сигнал/фон на требуемых дальностях снижается на несколько порядков (диапазон рабочих освещенностей составляет  $0 \dots 10^5$  лк, а диапазон освещенностей, на которых наблюдается фон в пассивном режиме, – от  $10^{-3}$  лк до  $10^5$  лк). Для обеспечения критического для обнаружения цели отношения требуется модифицированный активно-импульсный принцип, позволяющий существенно подавить фон.

Модификация заключается в подавлении яркого (в дневное время суток) фона комбинацией цветных и интерференционных фильтров, вырезающих узкую спектральную полосу, согласованную с длиной волны ЛФ. В таком приборе два порядка потока излучения от фона подавляется комбинированным спектральным фильтром и еще два порядка – использованием АИ принципа подсветки. Дополнительный двукратный выигрыш критического отношения сигнал/фон обеспечивается модулированной подсветкой фары на раздражающей глаз частоте в районе 1–3 Гц [29, 30, 66] (подробнее раскрыто в подразделе 5.3 диссертации). Метод позволяет видеть точечный мигающий отклик зондирующей лазерной подсветки от цели на ослабленном фоне, яркость которого определяется естественной дневной освещенностью.

На основании расчетов соискателем в свое время была инициирована разработка прицела-локатора оптических систем, которая привела к созданию гаммы антиснайперских прицелов: 1ПН106 (внешний вид показан на рис. 16, а технические характеристики приведены в таблице 10), 1ПН119, 1ПН120, 1ПН121, 1ПН123, группой в составе (помимо соискателя) Голубева П.Г., Сеницына Ю.А., Южика И.Б., Хухорова А.Г., Агеева А.С. и других разработчиков ЦКБ «Точприбор» (в настоящее время – АО «Швабе-Приборы»).

Позднее была выявлена информация о параллельной разработке [67] лазерной системы локации, сочетающей использование ЭОПа, лазерной фары и

активно-импульсного режима работы в РФ, и о прицеле, комбинирующем ЭОП и лазерный осветитель TLOS (AN/PLQ-8), разработанном компании ВАЕ для армии США [28].

### **5.1 Способы повышения эффективности лазерных локационных каналов**

Дальность и вероятность обнаружения цели лазерной системой локации определяются значением отношения сигнал/фон  $R$ , которое зависит от условий окружающей освещенности, мощности и спектрального диапазона лазерной фары, параметров фотоприемников и других конструктивных особенностей ЛЛК (не сигнал/шум, поскольку фон наблюдаемого сигнала определяется не шумом фотоприемника).

Очевидно, что чем ниже окружающая освещенность и выше мощность фары, тем выше воспринимаемое отношение сигнал/фон при заданной дальности или выше дальность обнаружения при фиксированном пороговом отношении сигнал/фон. Очевидно также, что величина  $R$  возрастает при уменьшении угловой расходимости излучения лазерной фары (за счет уменьшения скорости обзора пространства). Также понятна роль согласования спектрального диапазона приемника со спектром излучения фары, фокусного расстояния и диаметра входного зрачка. Поэтому возможности повышения эффективности ЛЛК обсуждаются далее при постоянной мощности, фиксированной угловой расходимости лазерной фары и прочих равных факторах.

Наибольшее отношение сигнал/фон при дневной освещенности обеспечивают лазерные локаторы, использующие активно-импульсный (АИ) принцип подсветки цели. Способность АИ принципа подавлять фон пропорционально скважности открытия оптико-электронного затвора позволяет поднять дальность обнаружения оптики системой локации, в зависимости от окружающей освещенности, в несколько раз.

Недостатком АИ принципа является необходимость поиска цели не только по азимуту и углу места, но еще и по дальности, что повышает длительность поиска неподвижной цели – в степени размерности зондируемого пространства

(3-я вместо 2-ой). Классическая АИ-система ночного видения может нивелировать этот недостаток методом обнаружения тени неоптических целей на светлом фоне при установке максимальной дальности строба. АИ-система локации оптики этот метод использовать, естественно, не может (вследствие малоразмерности оптической цели). Принимая во внимание, что оптическая цель осуществляет собственные задачи и реально не является неподвижной, нетрудно прийти к выводу, что использование классического АИ принципа в локации оптики поднимает дальность обнаружения неподвижной цели, но понижает поисковые характеристики.

Первый метод, позволяющий повысить скорость поиска цели, предложенный соискателем, – это автоматическое сканирование пространства по дальности в задаваемых оператором границах.

Полный просмотр пространства по дальности осуществляться прозрачно для оператора, в темпе поступления кадров (в приемных каналах телевизионного типа) или в темпе, определенном постоянными времени глаза оператора и экрана ЭОПа (в приемных каналах окулярного типа) за 20–100 мс. В первом случае, интегратором сигнала является приемная матрица, во втором – сетчатка глаза или экран электронно-оптического преобразователя. При этом, задавая границы сканирования дистанции в пределах глубины отдельного строба, получаем максимальное отношение сигнал/фон (соответствующее таковому при ручном сканировании по дальности), а, задавая максимальную глубину просматриваемого пространства, – минимальное отношение сигнал/фон, почти такое же, как при наблюдении с непрерывной фарой равной мощности. Задача оператора – учитывая рельеф местности, установить границы автоматического сканирования для достижения максимального отношения сигнал/фон при обеспечении просмотра всей видимой трассы.

Для лазера со средней мощностью  $P_{\text{ср}}$ , при непрерывной подсветке зондируемого пространства, отношение сигнал/фон составит

$$R = \frac{P_{\text{ср}}^{1/4} K_{\text{с}}}{B_{\text{ф}} S_{\text{фп}} K_{\text{ф}}},$$



где  $K_c$  – коэффициент, связывающий мощность излучения, возвращенного от цели, с корнем 4-й степени от мощности фары;  $B_\phi$  – яркость фона;  $S_{\text{фп}}$  – эффективная площадь элемента фотоприемника;  $K_\phi$  – коэффициент, связывающий облученность фотоприемника единичной площади с яркостью фона.

Аналогично, для АИ-локатора со стробом дальности, захватывающим цель, имеем прирост отношения сигнал/фон обратно пропорциональный скважности:

$$R = \frac{P_{\text{ср}}^{1/4} K_c}{B_\phi S_{\text{фп}} K_\phi S},$$

где  $S$  – скважность затвора.

Для АИ-локатора с автоматически сканируемыми по дальности стробами, отношение составит

$$R = \frac{P_{\text{ср}}^{1/4} K_c}{B_\phi S_{\text{фп}} K_\phi S k},$$

где  $k$  – количество стробов.

Таким образом, отношение сигнал/фон для АИ-ЛЛК с ручным управлением стробом дальности будет выше в  $1/S$  раз, а для АИ-ЛЛК с автоматическим сканированием дистанции – в  $1/S \cdot k$  раз выше, чем для ЛЛК с непрерывным излучателем. В частности, для локации с частотой импульсов лазерной фары  $f = 5$  кГц и длительностью строба открывания затвора  $\tau = 333$  нс (глубина строба 100 м) отношение сигнал/фон при ручном управлении стробом будет выше, чем для непрерывной фары той же средней мощности, при прочих равных параметрах, в  $1/S = 1/\tau \cdot f = 600$  раз. Для локации с автоматическим просмотром  $k = 10$  зон дальности, например от 100 до 1100 м, при тех же параметрах, величина  $R$  будет выше в  $1/S \cdot k = 60$  раз.

На рис. 49 приведен график относительной эффективности АИ-ЛЛ, автоматически сканирующего заданные границы от 0 до  $D$ , по сравнению с ЛЛ, использующим непрерывно излучающую фару, для различной глубины сканируемого пространства  $D$  в виде отношения  $R_{\text{АИ-ЛЛ}}/R_{\text{ЛЛ}}$ .

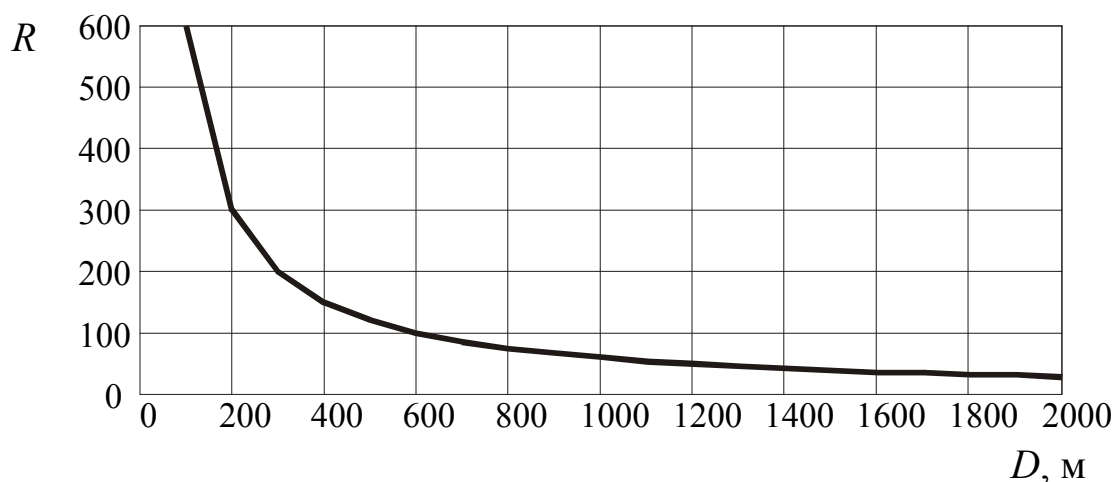


Рисунок 49 – График относительной эффективности АИ лазерного локатора, автоматически сканирующего заданные границы, по сравнению с лазерным локатором, использующим непрерывно излучающую фару, для различной глубины сканируемого пространства  $D$

График демонстрирует возможность компромиссного повышения отношения сигнал/фон при полном сохранении скорости поиска с непрерывной фарой за счет автоматического сканирования дистанции в границах, обусловленных наблюдаемым ландшафтом.

Ресурс для второго метода повышения эффективности заключен в избыточности мощности фары на ближних дистанциях. Для больших дистанций мощность всегда недостаточна, для малых – избыточна. Соискателем разработан и испытан способ восполнить недостаток мощности на дальних дистанциях за счет ближних [68, 69].

Максимальная и средняя мощности лазера ограничены и не могут быть увеличены без снижения его ресурса. Однако, средняя мощность, выделяемая на определенную зону участка пространства, может быть изменена за счет количества импульсов в секунду, выделяемых на данную зону. Выделение импульса именно на данную зону дальности заключается в задании соответствующей задержки строба открывания затвора приемника относительно импульса лазерной фары. Одни задержки можно использовать чаще, чем другие. Таким образом, не меняя фактической мощности лазерного импульса, можно

распределять среднюю воспринимаемую мощность по дальности (иными словами – распределять «внимание» системы «фара-затвор»).

Расчеты показывают, что распределение импульсов по дальности, обеспечивающее равную яркость равных целей на всей глубине зондируемого пространства, может либо повысить яркость наиболее удаленных целей в 4 раза, в одних и тех же границах автоматически сканируемой дальности, либо, соответственно, повысить дальность обнаружения в  $4^{1/4} = 1,4$  раза.

Например, при частоте лазерных импульсов 5 кГц и частоте кадров приемного канала 25 Гц, общее количество импульсов фары на кадр составит 208. Гистограммы равномерного (1) и пропорционального 4-й степени (2) распределения импульсов по 100-метровым зонам дальности от 100 до 2000 м, представленные на рис. 50, демонстрируют, что второе распределение дает выигрыш в средней энергии на максимальной дистанции в 4,6 раза. Линейное распределение, при тех же условиях, даст выигрыш в 1,8 раз, а квадратичное – в 2,7 раза.

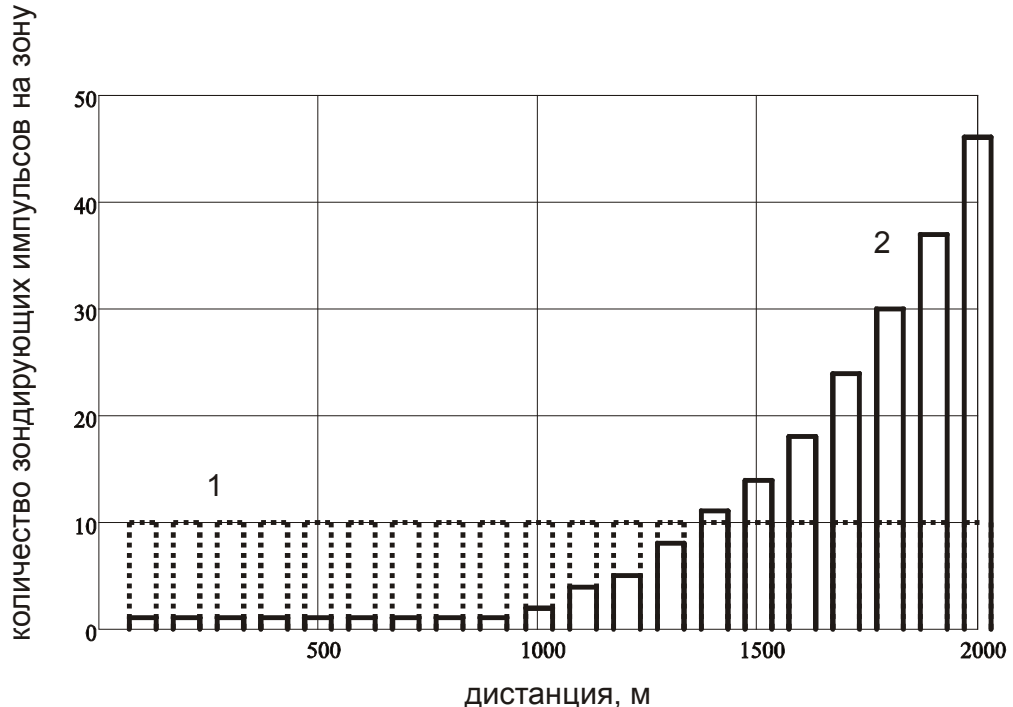


Рисунок 50 – Гистограмма распределения зондирующих импульсов системы фара-затвор по зонам наблюдаемой дистанции 2000 м

Метод автоматического просмотра комбинируется с методом распределения профиля средней мощности фары по дальности, с соответствующим умножением выигрыша.

Работоспособность обоих методов и их комбинации экспериментально подтверждена в макете МООЭП с лазерным локационным каналом [37], а позже и на макете цифровой активно-импульсной системы [46]. Прибор имеет четыре профиля распределения энергии фары по дальности при автоматическом сканировании – равномерный, линейно возрастающий, квадратичный и пропорциональный четвертой степени.

Таким образом, существует способ компромиссного повышения дальности обнаружения оптических систем за счет использования АИ-принципа с автоматическим сканированием в заданных границах дальности и измененным профилем распределения средней мощности лазерной фары по дальности, при скорости обзора пространства, характерной для лазерных локаторов с непрерывно излучающей фарой.

## **5.2 Описание конструкции лазерного локационного канала**

На рис. 51 приведена оптическая схема ЛЛК. Зондирование пространства производится лазерной фарой на базе полупроводникового лазера, на длине волны 0,83 мкм. Оптические и оптико-электронные средства, попадающие в зондируемую зону, дают отклик (за счет ретроотражения), который ярко наблюдается на естественном фоне, имеющем диффузный характер отражения излучения фары. Изображение с экрана ЭОП переносится на ПЗС-матрицу проекционной системой с линейным увеличением  $-0,45^{\times}$  и относительным отверстием (в пространстве изображения) 1:1,6. Предусмотрены управление мощностью лазерной фары, задание диапазона дистанций, просматриваемых в автоматическом режиме сканирования, установка протяженности и положения строка дальности в ручном режиме, а также переключение режимов работы.

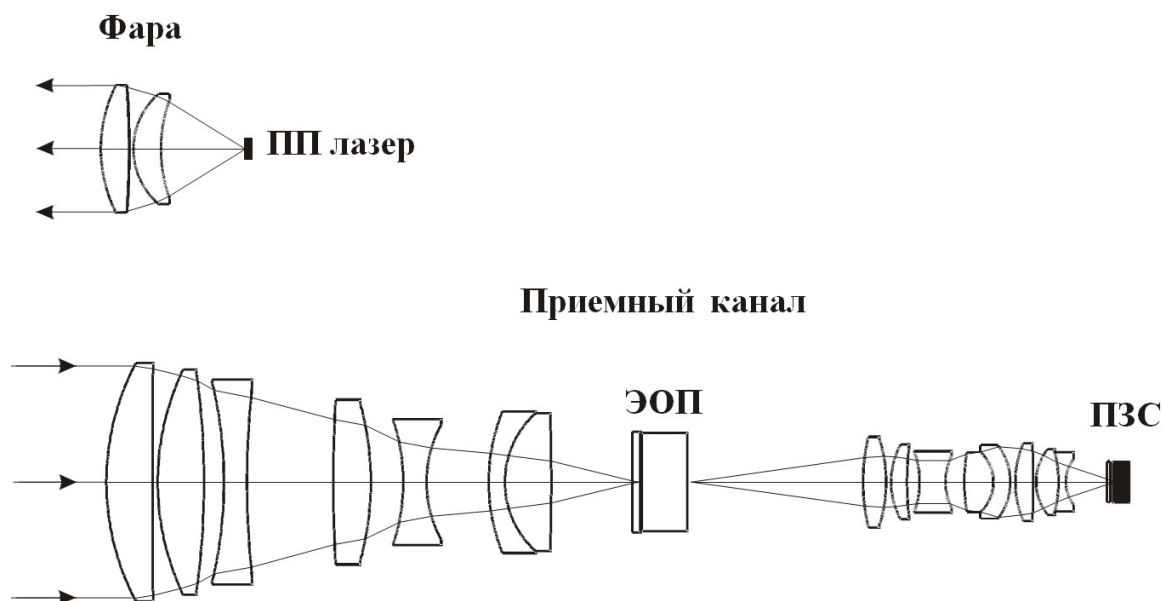


Рисунок 51 – Оптическая схема лазерного локационного канала

Поскольку в дневное время суток отношение сигнал/фон на требуемых дальностях снижается на несколько порядков (диапазон рабочих освещенностей составляет от 0 до  $10^5$  лк), для поддержания отношения выше пороговой величины был разработан модифицированный активно-импульсный принцип, позволяющий существенно подавить фон.

Обычно классический активно-импульсный прибор ночного видения (ПНВ) имеет узкое поле подсвета – до  $1^\circ$ , а также ручную регулировку положения строба дальности. Такая комбинация предопределяет его крайне низкие поисковые возможности, особенно если иметь в виду, что в момент попадания обнаруживаемого объекта одновременно в поле подсвета и строба дальности, он осуществляет свои собственные задачи и не обязательно обращен в сторону локатора.

Предложенная и примененная в макете модификация активно-импульсного принципа заключается в автоматическом сканировании строба по всему диапазону дальности за время каждого кадра ЛЛК. Оператор может выбрать один из четырех профилей распределения средней мощности фары по глубине сканирования, что существенно повышает дальность обнаружения цели при сохранении высоких поисковых характеристик.

Для использования в ЛЛК выбран ЭОП поколения 2+. Такой выбор имеет преимущество в быстродействии и стоимости, в то время как основное преимущество 3 поколения – высокий коэффициент усиления – в задаче локации оптических объектов оказывается невостребованным.

ЭОП (на базе серийного вакуумного блока ЭПМ44Г-А [70]) оснащен специально спроектированным импульсным источником питания, стробирующим его с частотой 5 кГц и длительностями переднего и заднего фронтов 50 нс и 25 нс соответственно, что обеспечивает круглосуточный активно-импульсный режим работы ЛЛК, а также возможность его пассивной работы днем и устойчивость к ярким световым помехам в ночное время суток.

Следует отметить, что в ЛЛК ЭОП выполняет, прежде всего, роль затвора, повышающего отношение сигнал/фон, поскольку дальность обнаружения цели в канале ограничена не собственным шумом приемника, а отношением сигнал/фон в светлое время суток. Расчеты дальности действия демонстрируют достаточность чувствительности ПЗС-матрицы для обнаружения ретроотраженного излучения в отсутствие солнечной засветки. Функция отображения фоновой обстановки, для которой в темное время суток необходим именно ЭОП, является вторичной и может быть возложена на ТПВК.

Основные технические данные ЭОПа на базе вакуумного блока ЭПМ44Г-А следующие [70]:

- Диаметр фотокатода 17,5 мм;
- Коэффициент передачи контраста 0,5 на пространственной частоте  $15 \text{ мм}^{-1}$ ;
- Интегральная чувствительность фотокатода 540 мкА/лм;
- Коэффициент преобразования  $2,5 \cdot 10^4$ ;
- Отношение сигнал/шум 55.

Для решения задачи отображения четкого точечного отклика бликующего объекта на длине волны 0,83–0,85 мкм через оптическую систему, которую оператор может фокусировать, наблюдая обстановку только в видимом диапазоне спектра, был разработан специальный широкоспектральный линзовый объектив–суперапохромат, исправленный в отношении хроматизма положения для четырех

длин волн (глава 4 диссертации). Объектив имеет фокусное расстояние  $f = 85$  мм, относительное отверстие 1:2 и размер абберационного пятна рассеяния в диапазоне длин волн 0,48–0,85 мкм менее 4 мкм по всей площади фотокатода ЭОП, что соответствует дифракционному пределу и значительно меньше шага микроканалов ЭОП (7 мкм). Такие параметры позволяют полностью реализовать рабочий спектральный диапазон ЭОП поколения 2<sup>+</sup> без применения каких-либо дополнительных отрезающих фильтров.

На момент разработки макета прибора были доступны фоточувствительные матрицы ПЗС ICX249A производства Sony, обеспечивающие возможность наблюдения объектов при освещенности до  $10^{-2}$  лк без потери в пространственном и временном разрешении (без использования режимов биннинга и временного накопления).

Основные характеристики сенсора ICX249 следующие [71]:

- Размер диагонали фоточувствительной области 8 мм (1/2")
- Формат изображения 752×528
- Шаг элементов 8,6 мкм × 8,3 мкм
- Тип развертки – чересстрочная

Зондирующая фара состоит из объектива и полупроводникового лазера с импульсным источником питания.

Наиболее мощным отечественным полупроводниковым лазером, на момент создания макета, являлся лазер Л-13 производства НПО «Инжент», г. Саратов. Основные характеристики лазера:

- Средняя мощность лазерного излучения: не менее 0,2 Вт;
- Длина волны лазерного излучения 0,83 мкм (заказанных образцов);
- Длительность фронта импульса не более 25 нс;
- Размер излучающей апертуры 1,5×3 мм.

Фара с лазером Л-13 и объективом  $f' = 30$  мм имеет расходимость  $3^\circ \times 6^\circ$

Важную роль в повышении отношения сигнал фон играют оптический фильтр, используемый в дневное время суток перед входным объективом для

подавления яркого фона без значительного ухудшения отраженного зондирующего сигнала.

Фильтр скомбинирован из цветных стекол и интерференционного фильтра с целью обеспечить максимальное относительное светопропускание на длине волны зондирующего излучения 0,83 мкм. В комбинированном фильтре использованы цветные стекла СЗС-20, КС14 и интерференционный фильтр (рис. 52–56)

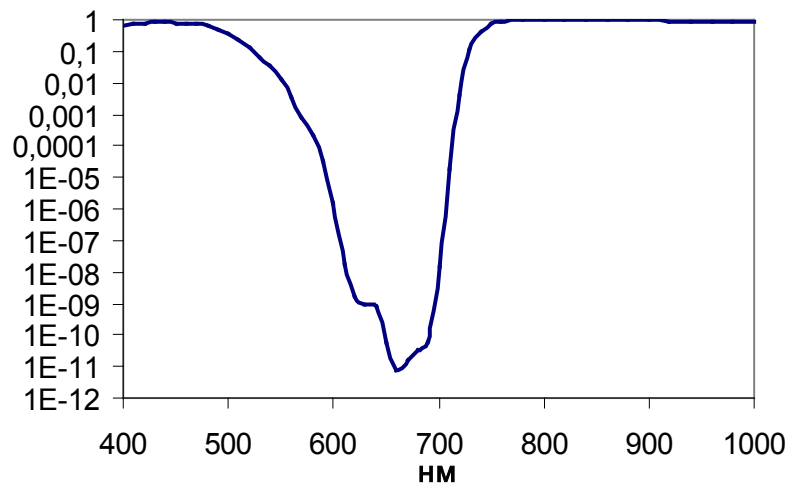


Рисунок 52 – График спектрального коэффициента пропускания стекла СЗС-20 при толщине 6 мм (0,97 на 830нм)

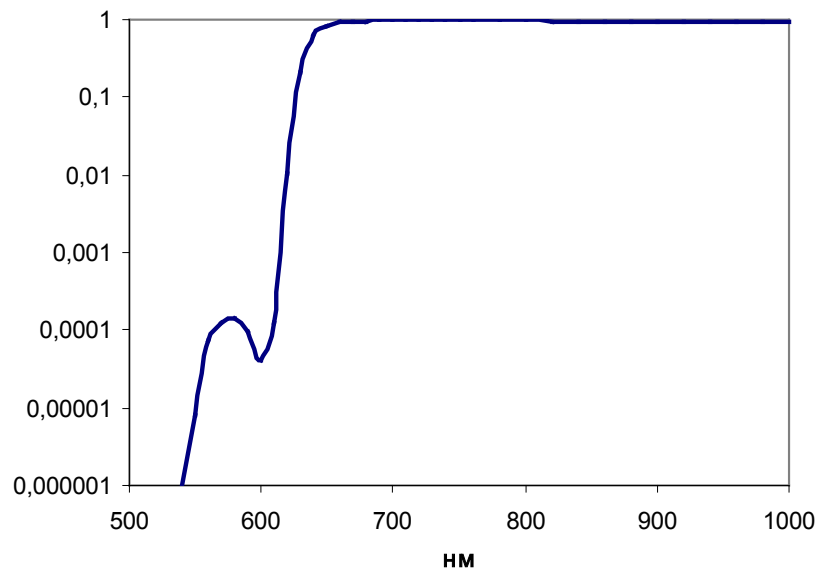


Рисунок 53 – График спектрального коэффициента пропускания стекла КС-14 при толщине 3 мм (0,97 на 830нм)



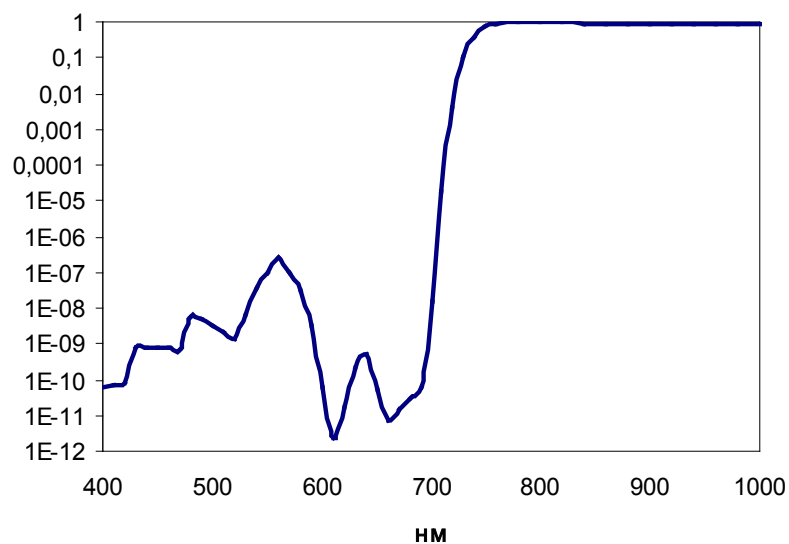


Рисунок 54 – График коэффициента спектрального пропускания стекла комбинации стекол СЗС20 и КС14 (0,93 на 830 нм)

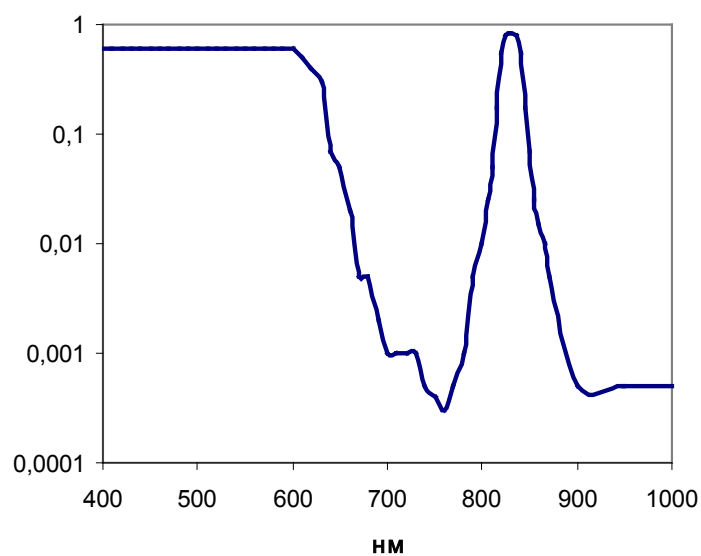


Рисунок 55 – График спектрального пропускания стекла интерференционного фильтра (0,82 на 830 нм)

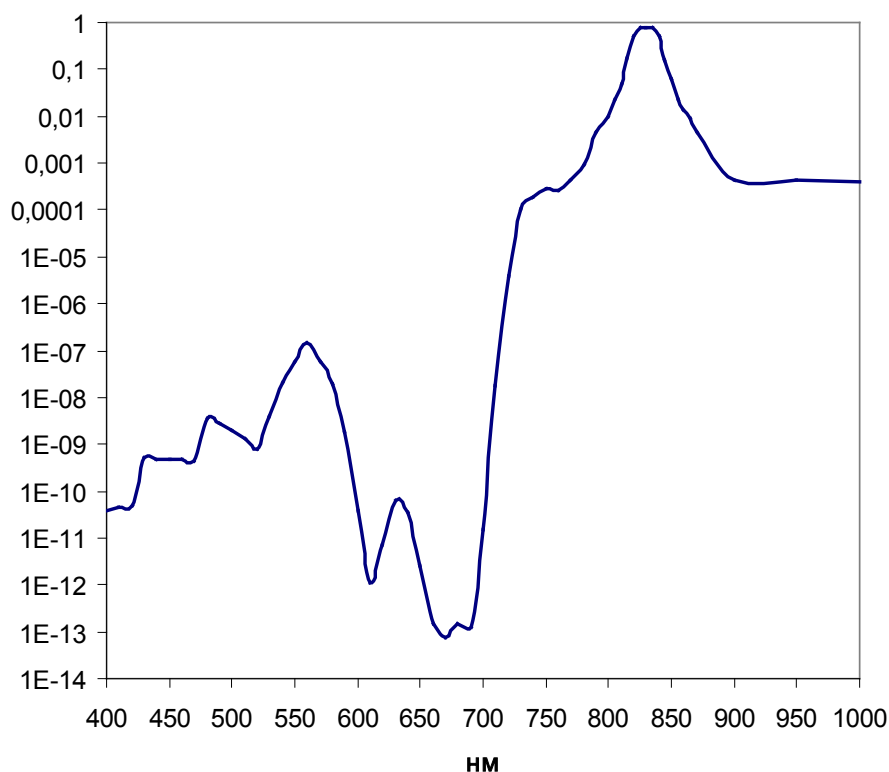


Рисунок 56 – График спектрального пропускания комбинации цветных стекол и интерференционного фильтра

Расчетный интегральный коэффициент пропускания комбинации фильтров в спектральном диапазоне 400–1000 нм составляет 2,5%, а коэффициент пропускания на длине волны 830 нм – 0,77.

### 5.3 Расчетная оценка дальности действия лазерного локационного канала

Для расчетов дальности действия лазерной системы обнаружения оптических систем необходимо знать освещенность фона, интенсивность сигнала цели, а также вероятность обнаружения точечной мигающей цели оператором на ярком неоднородном фоне.

#### 5.3.1 Пороговое отношение сигнал/фон при обнаружении точечных объектов

Задача обнаружения оператором точечной цели многократно исследована в литературе, в интересах расчета дальности действия и поисковых характеристик тепловизионных, телевизионных, ночных и других систем наблюдения.

С появлением лазерных систем локации оптико-электронных приборов (ОЭП), которые сами влияют на вид целе-фоновой обстановки, у данной задачи

появилась еще одна компонента – использование и учет вклада модуляции интенсивности изображения цели для повышения ее заметности. В изображении лазерной локационной системы яркость фона, имеющего диффузный характер отражения излучения, определяется окружающей освещенностью местности, а яркость цели определяется ретро-отражением зондирующего излучения. Таким образом, появляется возможность искусственно разделить характеристики цели и фона в изображении и соответствующая необходимость учесть такую возможность в расчете.

Вероятность обнаружения оператором точечной цели постоянной яркости в зависимости от отношения сигнал/шум или контраста цель/фон описана в литературе, затрагивающей расчеты дальности действия и поисковых характеристик приборов ночного видения, тепловизионных, телевизионных и других систем наблюдения. Например, в работах F. Rosell и R. Willson [72–74], определена зависимость вероятности обнаружения целей на фоне белого шума в телевизионном изображении от отношения сигнал/шум в виде s-образной кривой с пороговым значением (вероятность 50%) на уровне сигнал/шум равным 3.

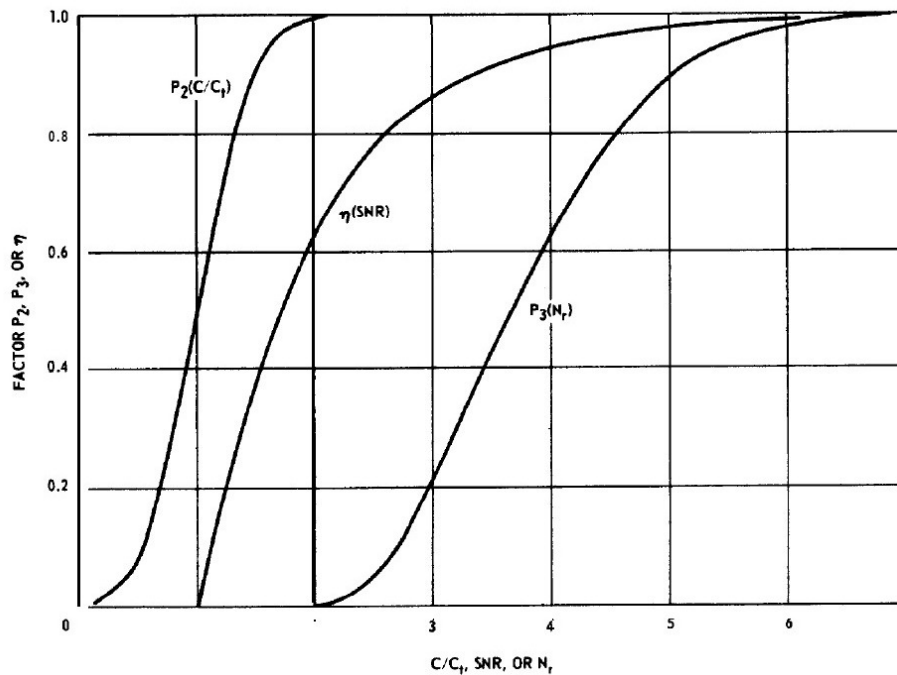


Рисунок 57 – Зависимости вероятности обнаружения цели от отношения сигнал/шум (кривая обозначена как  $\eta(\text{SNR})$ ) и от отношения контраста цель/фон к пороговому контрасту ( $P_2(C/C_t)$ ) в модели Rand Corporation [75]

Расчетная модель Rand Corporation [75] (рис. 57) использует зависимости вероятности обнаружения как от отношения сигнал/шум, так и от отношения контраста цель/фон к пороговому контрасту ( $P_2(C/C_t)$ ).

В системах обнаружения оптики по ретроотраженному излучению, однако, во-первых, имеем дело с обнаружением цели не на фоне шума или однородной по яркости сцены, а на фоне изображения местности с произвольным распределением яркостей. Т.е. требуется знать пороговое отношение сигнала цели  $U_c$  к фону  $U_\phi$ , где сигнал, создаваемый фоном, произвольно варьируется в пределах от 0 до  $U_\phi$ . Во-вторых, для выделения цели на ярком фоне можно модулировать излучение зондирующего лазера (фары) так, чтобы интересующая цель мигала, что, по опыту полевых испытаний, повышает ее заметность на неоднородном фоне. В изображении лазерной системы локации оптики яркость фона, имеющего диффузный характер отражения излучения, определяется окружающей освещенностью местности, а яркость цели определяется ретроотражением зондирующего излучения. В литературных источниках по проектированию оптико-электронных систем требуемые сведения о влиянии модуляции цели на дальность ее обнаружения не обнаружены.

Задача обнаружения мигающих точечных источников, в ракурсе обнаружения наблюдателем маяков и других точечных источников видимого излучения, описана в литературе по светотехнике [76–78]. Здесь процесс визуального обнаружения точного источника переменной интенсивности на черном фоне описан в виде зависимости длительности вспышки цели от пороговой яркости необходимой для обнаружения с заданной вероятностью (рис. 58). Формулы для описания данной связи, предложенные Блохом-Шарпантье, Блонделем и Реем, Луизовым, отличаясь в деталях и цифрах, утверждают, что пороговая яркость для мигающей цели всегда выше, чем для немигающей.

Поскольку экспериментальные данные для цели на неоднородном фоне демонстрируют обратное, светотехническая модель, пригодная для черного фона, для описания системы обнаружения бликов оптики на ярких неоднородных фонах не пригодна.

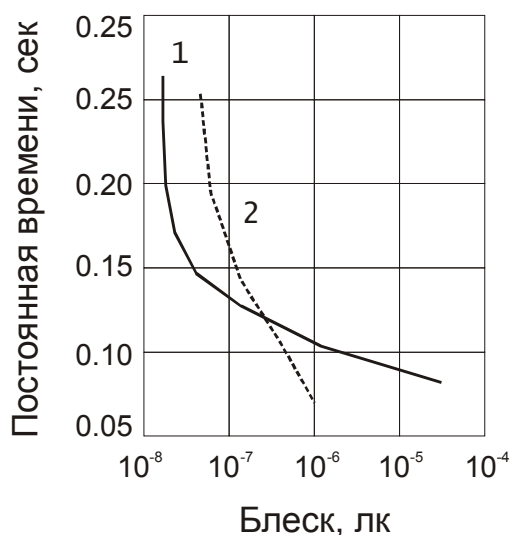


Рисунок 58 – Зависимость порогового блеска от длительности вспышки по Блонделю и Рею (1), по Луизову (2)

Для получения требуемых данных, соискателем, совместно с А.А. Голицыным, была проделана экспериментальная работа по определению вероятности обнаружения мигающей цели на ярком неоднородном фоне в функции отношения сигнал/фон [30]. Работа выполнена на базе специально разработанной программы имитации фоно-целевой обстановки с задаваемыми временными и пространственными параметрами цели и фона. Для цели задаются значения диаметра в пикселях, яркости, частоты и скважности миганий, а для фона – максимальные значения яркости. В качестве фона использован банк монохромных изображений реальных ландшафтов. Часть изображений предварительно обработана для обеспечения равномерной частотной гистограммы яркостей.

В процессе измерений оператору предъявляется на фиксированное время сцена с фоном и случайно расположенной целью (рис. 59). Задача оператора – указать положение цели мышью. Промак или исчерпание установленного времени засчитывается как ошибка. Результаты представлены для лимита времени обнаружения 3 сек. Статистика накапливается в виде файла для последующего представления и анализа любой программой анализа данных.





Рисунок 59 – Пример изображения фона и блика

Изображение фона нормируется по амплитуде в заданных пределах. Интенсивность изображения цели суммируется с интенсивностью фона, как это характерно для реальной системы локации ОЭП (рис. 60). Результаты измеряются в виде отношения яркости цели к максимальной яркости фона. Под яркостью, в данном случае, понимается не светотехническая величина в люксах, а значение интенсивности монохромного сигнала от 0 до 255.



Рисунок 60 – Пример изображения фона и блика

На рисунках 61–63 показаны примеры результатов, полученных при различных параметрах изображения фонов, при частоте мигания цели 3 Гц, а на рис. 64 – сводный график. На оси абсцисс нанесены значения отношения сигнал/фон для мигающей и не мигающей цели, а на ось ординат – вероятность обнаружения. Сплошной линией показана зависимость для мигающего блика, а прерывистой – для немигающего.

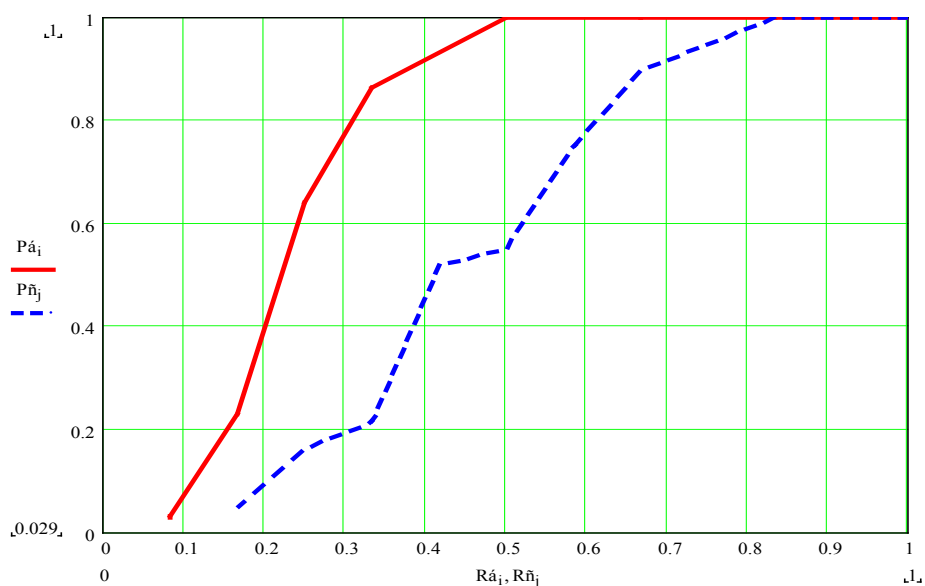


Рисунок 61 – Вероятность обнаружения точечного сигнала на фоне с неравномерно распределенной яркостью в зависимости от отношения сигнал/фон

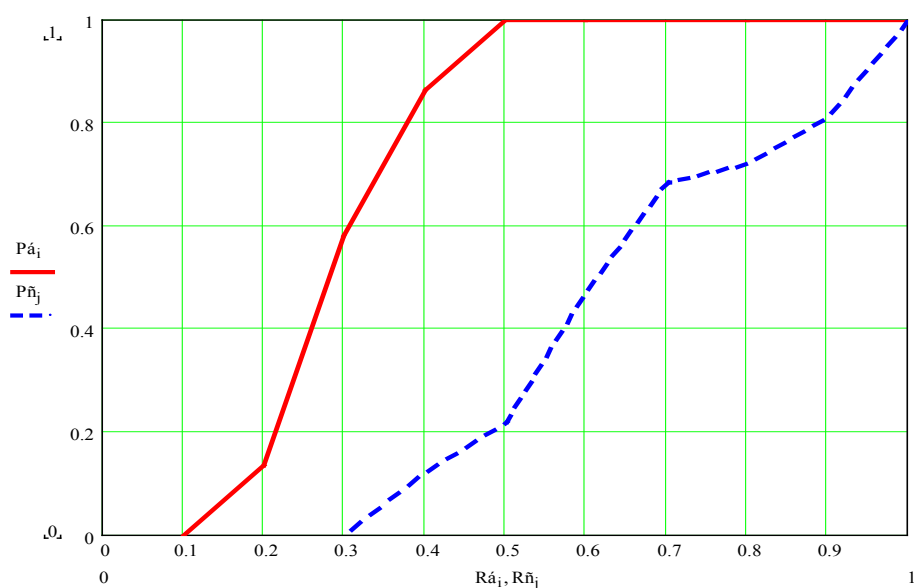


Рисунок 62 – Вероятность обнаружения точечного сигнала на фоне с равномерно распределенной по экрану и по частоте яркостью (использована локальная эквализация гистограммы яркости) в зависимости от отношения сигнал/фон

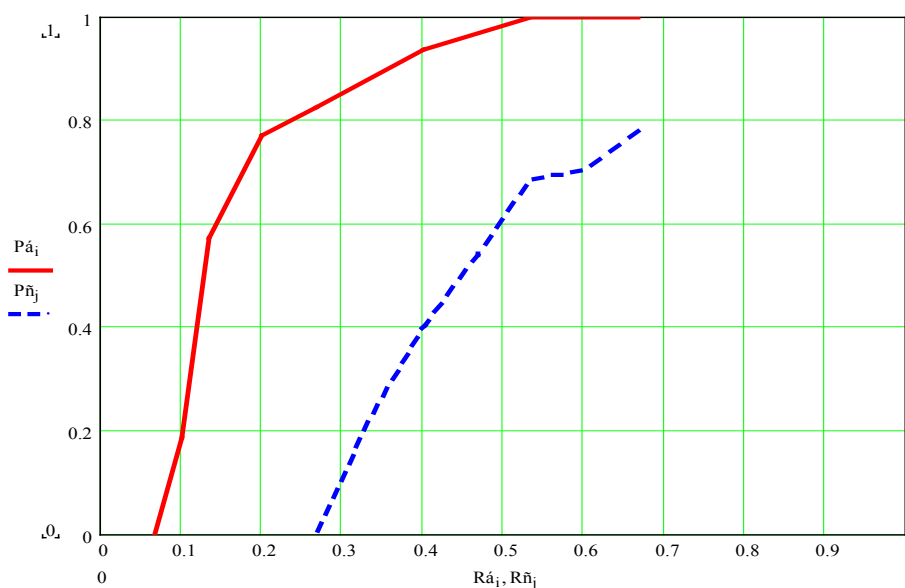


Рисунок 63 – Вероятность обнаружения точечного сигнала на неоднородном фоне, равномерно распределенном по частоте яркости (использована эквализация гистограммы яркости) в зависимости от отношения сигнал/фон

На сводном графике (рис. 64) пары кривых (мигающий блик – немигающий блик) для одних и тех же условий показаны одним цветом. Частота миганий выбрана из соображений наибольшей заметности оператором. Оно соответствует рекомендациям по выбору частоты мигания для привлечения внимания в диапазоне от 1 до 3 Гц при заполняемости 50%, приведенным в [79].

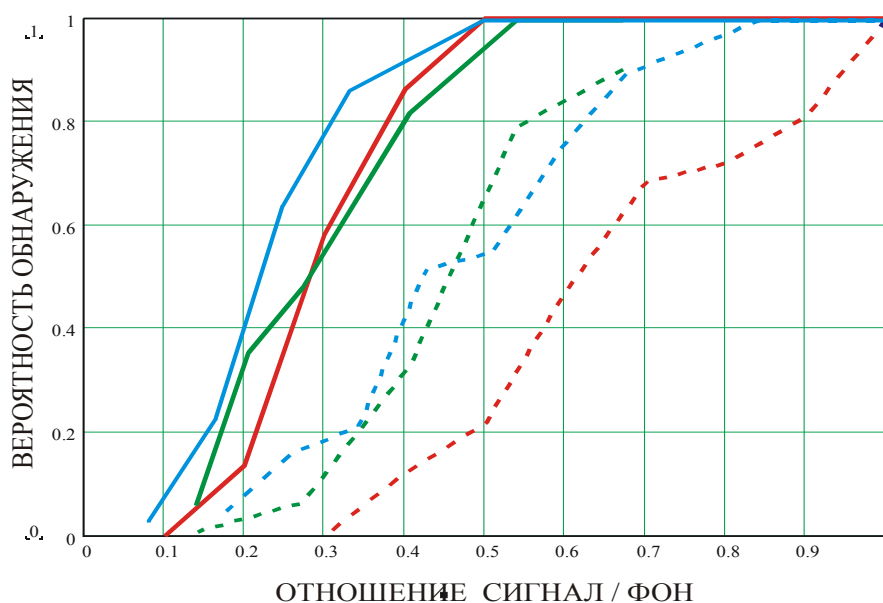


Рисунок 64 – Сводные графики экспериментов



На рис. 65 проинтерпретирована разница в вероятности обнаружения и отношении сигнал/фон для мигающей и не мигающей цели. Видно, что, когда вероятность обнаружения мигающего блика составляет 0,9, то вероятность для немигающего будет только 0,15, т.е. в 6 раз меньше. Пороговое отношение сигнал/фон для вероятностей обнаружения 0,9 и 0,5 в случае мигающего блика меньше в 2,5 раза по сравнению с немигающим.

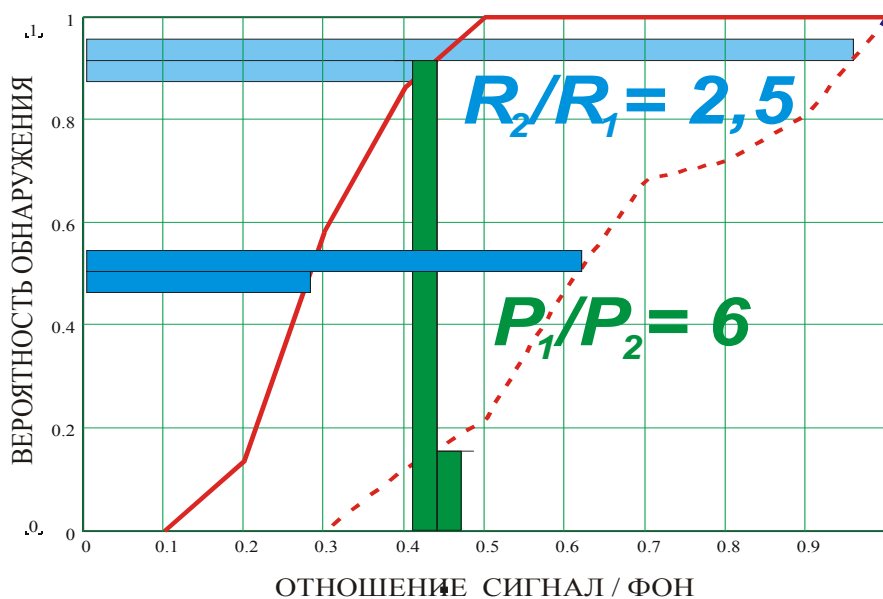


Рисунок 65 – Интерпретация графиков

При использовании результатов в расчетах дальности и вероятности обнаружения следует учесть, что отношение сигнал/фон в принятой в исследовании модели и указанное на графиках рассчитывается как  $R_{с/ф} = U_c/U_\phi$ , в то время, как интенсивность сигнала цели и фона в изображении на экране складывается, т.е. отношение сигнал/фон может интерпретироваться и как  $(U_c+U_\phi)/U_\phi$ , а  $U_\phi$  соответствует максимальному, а не действующему значению интенсивности фона.

Таким образом, установлено, что:

- для обнаружения точечной цели, мигающей с частотой порядка единиц Гц, с вероятностью 0,9, пороговое отношение сигнал/фон составляет 0,4–0,5;
- пороговое отношение сигнал/фон для обнаружения точечной мигающей цели может быть до 2,5 раза меньшим, чем для не мигающей.

### 5.3.2 Расчетная оценка дальности действия лазерного локационного канала

Существуют разные методики расчета дальности действия активно-импульсной системы [80–82]. Сигнал формируется потоком излучения от цели (рис. 66).

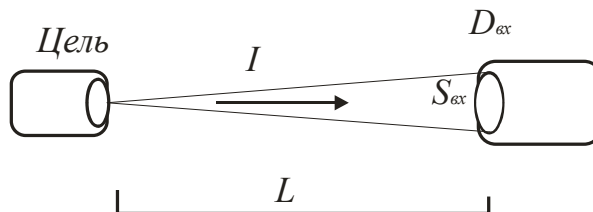


Рисунок 66 – Поток, отраженный от цели в приемный объектив

Поток, попадающий на приемный объектив от цели, бликующей с энергетической силой излучения  $I$ , составляет:

$$\Phi = I \cdot \frac{S_{\text{вх}}}{L^2} \cdot \tau(L) = I \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{вх}}^2}{4 \cdot L^2} \cdot \tau(L),$$

где  $I$  – сила излучения отраженного от цели, Вт/ср;  $S_{\text{вх}}$  – площадь входного зрачка приемного объектива,  $\text{м}^2$ ;  $L$  – расстояние до цели, м;  $D_{\text{вх}}$  – диаметр входного зрачка;  $\tau(L)$  – коэффициент пропускания атмосферы в функции расстояния.

Силу отраженного целью излучения можно установить из определения показателя световозвращения цели:

$$R = I / E,$$

где  $R$  – показатель световозвращения,  $\text{м}^2/\text{ср}$ ;  $E$  – освещенность, формируемая источником зондирующего излучения в плоскости цели,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ . Откуда следует:

$$I = R \cdot E$$

Освещенность, формируемая источником зондирующего излучения в плоскости цели, определяется как

$$E = \frac{f^2}{abL^2} P_u \cdot K_u \cdot \tau(L),$$

где  $f$  – фокусное расстояние объектива источника зондирующего излучения, м;  $a$  и  $b$  – геометрические размеры апертуры полупроводникового лазера, м;  $P_u$  – мощность полупроводникового лазера, Вт;  $K_u$  – коэффициент использования потока полупроводникового лазера объективом излучателя.

Таким образом, поток излучения, попадающий в приемный объектив от бликующей цели, составляет:

$$\Phi = R \cdot \frac{f^2}{abL^2} P_u \cdot K_u \cdot \tau(L) \cdot \frac{\pi \cdot D_{ex}^2}{4 \cdot L^2} \cdot \tau(L) = \frac{\pi}{4} R \cdot \frac{f^2 \cdot D_{ex}^2}{abL^4} \cdot K_u \cdot \tau(L)^2$$

В свою очередь, сигнал от фона в непрерывном режиме зондирования формируется потоком  $\Phi_\phi$  от фона, который определяется естественной окружающей освещенностью

$$\Phi_\phi = E_\lambda \cdot B_\lambda \cdot \frac{O \cdot p^2}{4}$$

где  $E_\lambda$  – естественная освещенность местности;  $B_\lambda$  – спектральный коэффициент пропускания фильтра в приемном канале;  $O$  – относительное отверстие объектива приемного канала;  $p$  – эквивалентный шаг элементов фотоприемной матрицы, с учетом увеличения проекционной системы в фокальной плоскости приемного объектива (на фотокатоде ЭОПа).

В активно-импульсном режиме зондирования с ручным управлением положения строба дальности, поток от фона надо умножить на коэффициент заполнения  $K_d$  (величина, обратная скважности импульсов).

В режиме автоматического сканирования по дальности значение фонового потока надо умножить на коэффициент заполнения  $K_z$  и количество стробов дальности  $N_{сд}$ , приходящихся на выбранный диапазон сканирования.

Пороговой дальностью, на которой оператор обнаруживает цель с вероятностью 90%, будет являться дальность, на которой сумма яркости цели и фона будет превосходить яркость фона в пороговое значение отношения сигнал/фон (1,5 раза).

Конструктивные параметры зондирующего излучателя и приемного канала определены в подразделе, описывающем конструкцию. Остается определить параметры фона, цели и атмосферы.

В самом тяжелом для обнаружения случае (яркий солнечный день) энергетическая освещенность, по данным [83], в видимом и ближнем ИК диапазоне спектра, составляет 1000 Вт/м<sup>2</sup>мкм. Используемый комбинированный

спектральный фильтр позволяет подавить фоновый сигнал за пределами спектральной полосы полупроводникового лазера фары в 0,01 мкм.

Показатель световозвращения различных приборов может меняться на несколько порядков. Для целей сопоставления различных приборов удобно взять наиболее массовый в РФ снайперский прицел ПСО-1. Его показатель световозвращения в различных образцах может меняться в 2 раза. В качестве эталона, в расчете принята наиболее жесткая величина  $17 \text{ м}^2/\text{ср}$  из измеренных методами, описанными в [84].

При распространении в атмосфере, интенсивность лазерного излучения уменьшается по закону Бугера (без учета расходимости излучения), согласно которому коэффициент пропускания среды является функцией дистанции  $L$  распространения излучения в среде [85]:

$$\tau(L) = \exp(-\gamma \cdot L)$$

где  $\gamma$  – показатель ослабления, равный сумме показателей рассеяния  $\gamma_p$  и поглощения,  $\gamma_{\text{п}}$ ,  $\text{м}^{-1}$ ;  $L$  – дистанция распространения излучения, м.

Спектр молекулярного поглощения приведен на рис. 67 (взят из [86]). В ближнем ИК-диапазоне, молекулярное поглощение определяется молекулами воды ( $\lambda = 0,86$  и  $0,93$  мкм) и кислорода ( $\lambda = 0,8$  мкм), поэтому наилучшие условия соответствуют длинам волн  $0,83$  и  $0,92$  мкм [85].

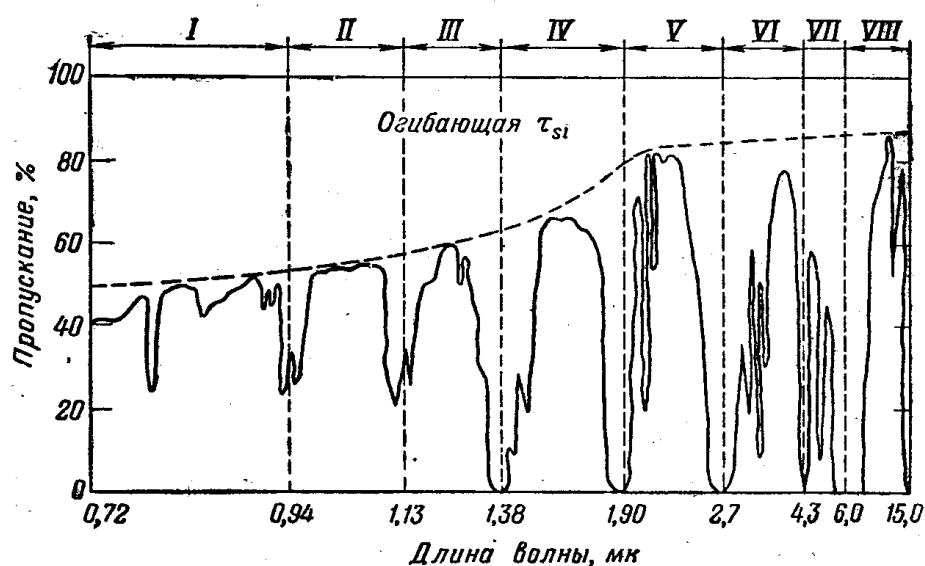


Рисунок 67 – Спектр молекулярного поглощения атмосферы [86]

Показатель рассеяния определяется рэлеевским рассеянием на частицах, размеры которых соизмеримы с длиной волны и Ми-рассеянием на частицах, размеры которых существенно больше длины волны. Поскольку в расчете не ставится задача определения дальности при различных состояниях атмосферы с различными вариантами аэрозолей и пыли, а интересует упрощенный вопрос (как он формулируется в технических заданиях на локационные приборы) – каков будет показатель поглощения при дальности метеовидимости 5 км, воспользуемся сведениями, что, при условии попадания в окно спектра молекулярного поглощения 0,83 мкм, показатель ослабления будет определяться Ми-рассеянием по формуле:

$$\gamma_p^{(M)} = \frac{3,91}{\nu} \left( \frac{\lambda}{0,55} \right)^{-0,585\nu^{1/3}}$$

где  $\nu$  – метеорологическая дальность видимости, км;  $\lambda$  – длина волны, мкм.

Таким образом, интересующий нас показатель ослабления, при дальности метеовидимости 5 км, и длине волны лазера 0,83 мкм, составляет  $0,518 \text{ км}^{-1}$

На рис. 68, приведены расчетные графики отношения сигнал/фон, при выбранных конструктивных элементах, эталонной цели (с ПСВ  $17 \text{ м}^2/\text{ср}$ ) и яркой дневной освещенности 100 тысяч люкс на горизонтальной трассе, для трех вариантов подсветки со средней мощностью 0,2 Вт: непрерывная (розовый), классическая ручная активно-импульсная с глубиной строба 100 м (красный) и автоматически сканирующая (в пределах 100–1000 м) активно-импульсная с глубиной строба 100 м (синий).

Данные графики показывают, что, при приведенных выше параметрах прибора, цели и внешних условий наблюдения, критическое отношение сигнал/фон достигается на дальности 150 м для непрерывной подсветки, 600 м – для ручной активно-импульсной и 350 м – для автоматической активно-импульсной.

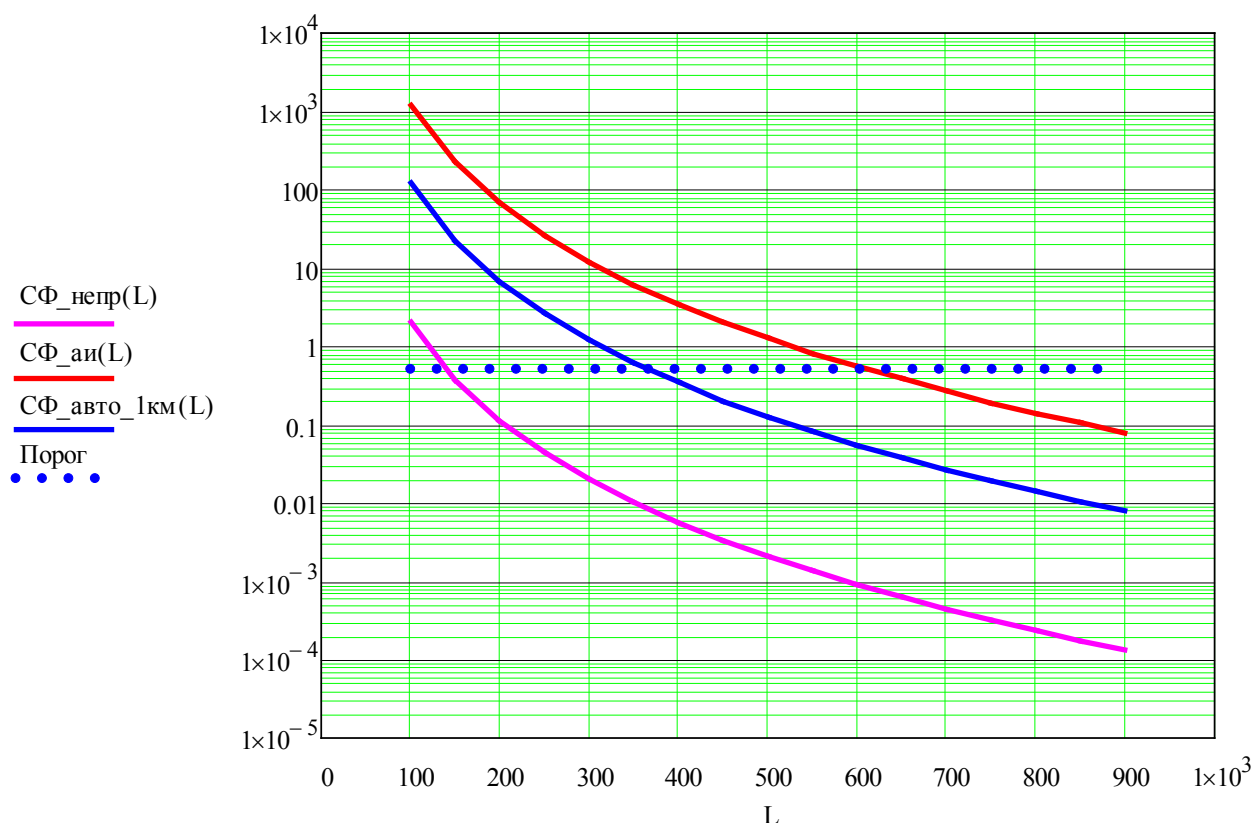


Рисунок 68 – Расчетная зависимость отношения сигнал/фон от дальности цели при непрерывном (СФ\_непр), активно-импульсном ручном (СФ\_ай) и активно-импульсном автоматическом зондировании пространства на глубину 1 км (СФ\_авто\_1км) при освещенности  $10^5$  лк и дальности метеовидимости 5 км

При изменении глубины автоматически сканируемой зоны от 100 м до 3000 м, дальность обнаружения при автоматически сканирующей АИ подсветке, при тех же условиях, будет меняться от 600 м (как для ручного поиска в активно-импульсном режиме) до 300 м. Задача оператора – выбрать разумные пределы сканируемой зоны для обеспечения максимальной вероятности обнаружения цели или разбить пространство на несколько зон по глубине. Но, даже при выборе избыточных дальностей порядка 5 км, режим сканирования уже имеет преимущества по сравнению с непрерывной подсветкой.

Рис. 69 отображает вклад применения метода профилирования средней мощности фары (черный) на фоне кривых с предыдущего графика. При применении режима профилирования распределения энергии пары лазер-затвор по дальности пропорционально 4 степени дальности, в комбинации с режимом

автоматического сканирования в пределах 0–500 м, отношение сигнал снижается на 3 порядка медленнее, обрываясь на 500 метрах. В этом режиме преимущество по сравнению с ручным активно-импульсным режимом будет заключаться в просмотре всей глубины пространства, а не короткого строба дальности 100 м.

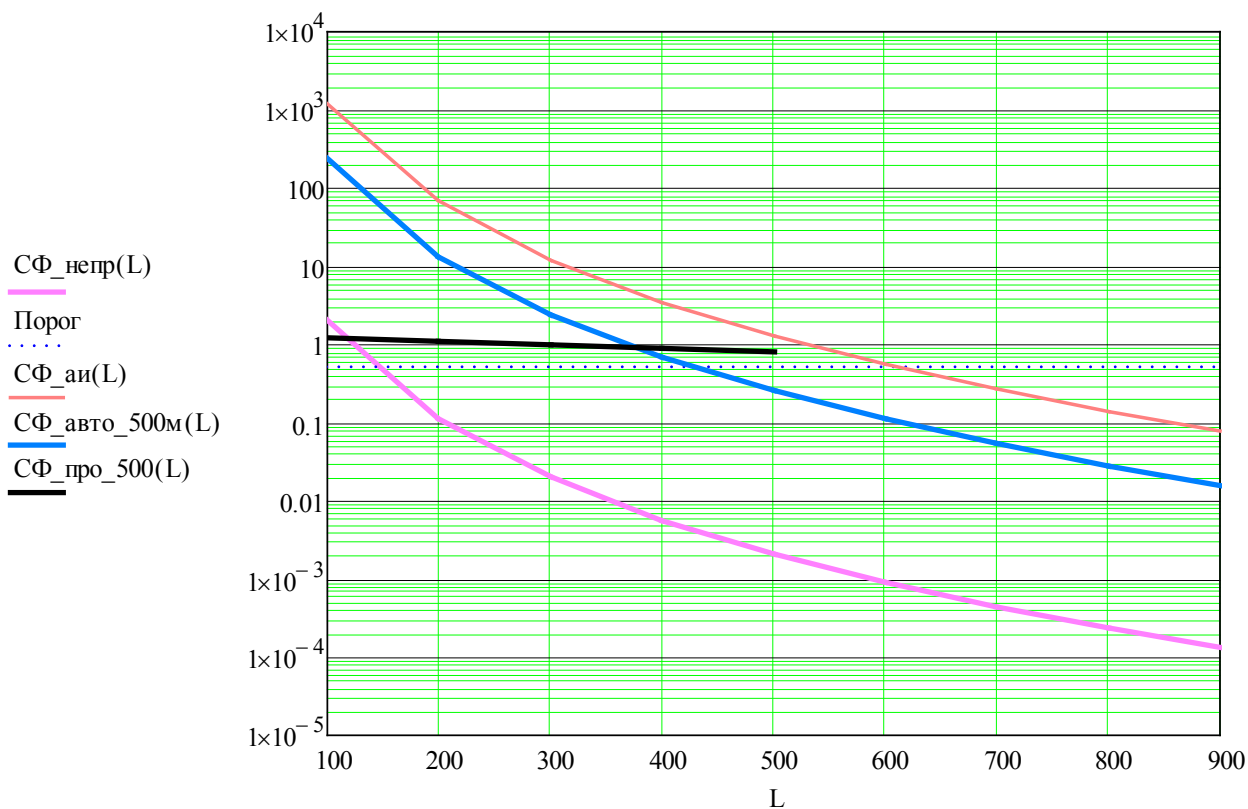


Рисунок 69 – Расчетная зависимость отношения сигнал/фон при применении метода профилирования средней мощности по дистанции (черная кривая) до 500 метров

Следует отметить, что на графиках (рис. 68 и 69), был представлен самый жесткий случай наблюдения прицела с малым входным зрачком в яркий солнечный день. В условиях понижения окружающей освещенности дальности обнаружения во всех режимах подсветки повышаются. В сумерках (10 лк) дальности обнаружения эталонного ПСО-1 в АИ режимах превышают 2000 м (рис. 70).

Очевидно, что дальнейшее понижение освещенности ведет к повышению дальности обнаружения до тех, пор пока могут использоваться дневные прицелы. Ночные же прицелы имеют на несколько порядков больший ПСВ и не представляют трудностей для любых вариантов подсветки.

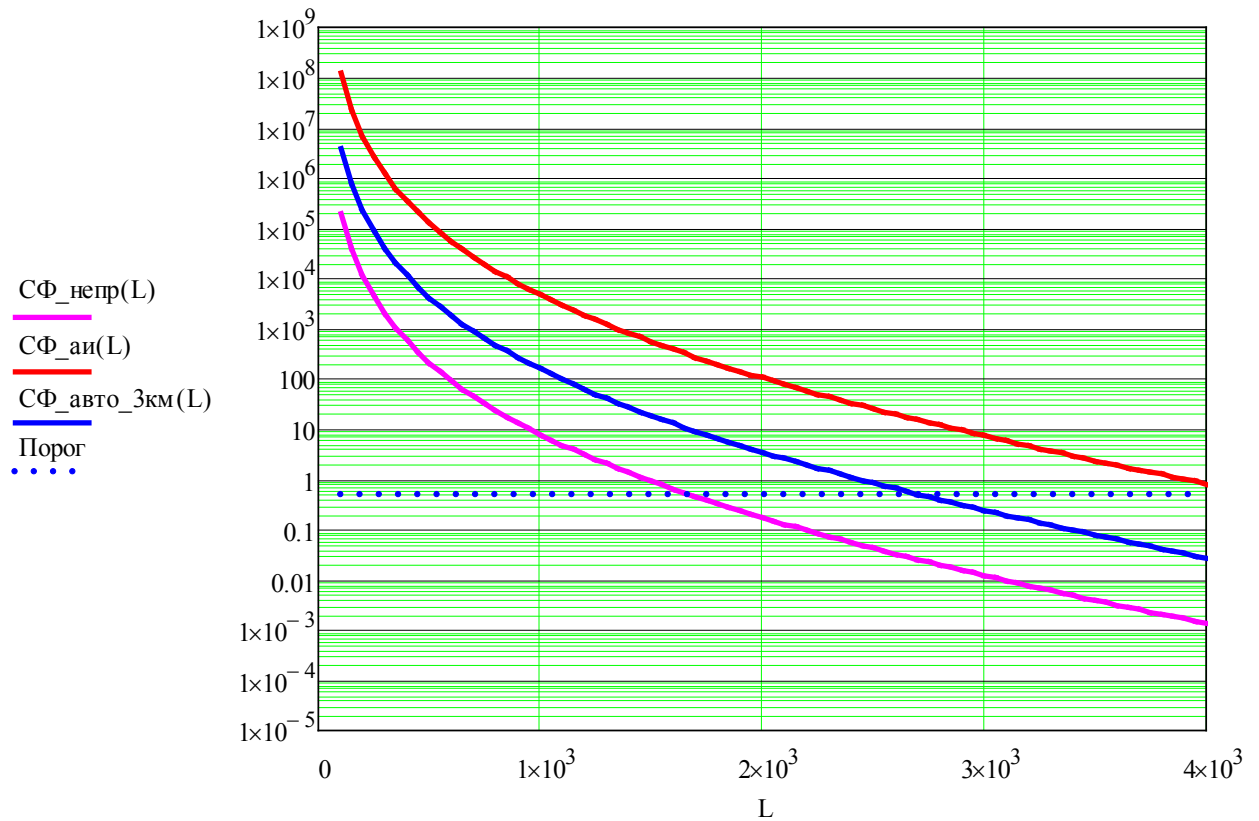


Рисунок 70 – Расчетная зависимость отношения сигнал/фон от дальности цели в сумерках (10 лк)



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соискателем предложен и экспериментально апробирован метод обеспечения единого масштаба изображений каналов ручного оптико-электронного прибора за счет согласования угловых полей элементов (или групп элементов) фотоприемных матриц по вертикали на этапе габаритного расчета, с учетом проекционной системы лазерного локационного канала.

Предложены и экспериментально исследованы методы и средства обеспечения единого масштаба изображений каналов в процессе проектирования, производства и эксплуатации МОЭП: ограничение дисторсии оптических систем каналов на этапе расчета, введение подрегулировки увеличения в проекционную систему и субпиксельного электронного увеличения тепловизионного канала по горизонтали во fusion-процессоре.

Предложена модификация метода расчета и рассчитан приемный объектив-суперапохромат лазерного локационного канала с исправленным на четырех длинах волн хроматизмом положения, при высоком относительном отверстии 1:2, полном использовании спектрального диапазона ЭОПа поколения 2+ (0,43–0,88 мкм) и максимальной дальности обнаружения цели.

Предложены, теоретически и экспериментально подтверждены методы повышения скорости поиска и дальности обнаружения цели лазерного локационного канала: автоматическое сканирование пространства по дальности, в задаваемых оператором границах, модуляция подсветки и распределение средней мощности фары пропорционально четвертой степени дистанции.

В результате проведенных работ и исследований разработан, изготовлен и испытан экспериментальный образец прибора наблюдения с тепловизионным и лазерным локационными каналами.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

АИ – активно-импульсный

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

БТТ – бронетанковая техника

ИК – инфракрасный

ЛДК – лазерный дальномерный канал

ЛЛК – лазерный локационный канал

ЛЛОС – лазерный локаатор оптических систем

ЛЛПК – лазерные локационные приборы и каналы

ЛФ – лазерная фара

МБМ – микроболометрическая матрица

МОЭП – многоканальный оптико-электронный прибор

НТВК – низкоуровневая телевизионная камера

ОЭП – оптико-электронный прибор

ОЭС – оптико-электронная система

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ПК – персональный компьютер

ПНВ – прибор ночного видения

РФС – ростовая фигура солдата

ТВ – телевизионный

ТВК – телевизионный визирный канал

ТПВ – тепловизионный

ТПВК – тепловизионный визирный канал

ФП – фотоприемный(ая)

ФПМ – функция передачи модуляции

ФПУ – фотоприемное устройство

ЭОП – оптико-электронный преобразователь

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Hall D.L. Handbook of multisensor data fusion / D.L. Hall, J. Llinas – CRC Press LLC, 2001. – 537 p. – ISBN 0-8493-2379-7.
2. Blum R. Multi-sensor image fusion and its applications / R. Blum, L. Zheng – Taylor & Francis Group, 2006. – 499 p. – ISBN 0-8493-3417-9.
3. Mitchell H. Image Fusion: Theories, Techniques and Applications / H. Mitchell – Springer-Verlag, 2010. – 247 p. – ISBN 978-3-642-11216-4.
4. Alparone L. Remote Sensing Image Fusion / L. Alparone, B. Aiazzi, S. Baronti, A. Garzelli – Taylor & Francis Group LLC. 2015. – 299 p. – ISBN 978-1-4665-8750-2.
5. Pohl C. Remote Sensing Image Fusion: a practical guide / C. Pohl, J. Van Genderen – Taylor & Francis Group, 2017. – 253 p. – ISBN 9781498730020.
6. Manjunath J. Multiresolution Image Fusion in Remote Sensing / J. Manjunath, U. Kishor – Cambridge University Press, 2019. – 234 p. – ISBN 9781108475129.
7. Chang N. Multisensor Data Fusion and Machine Learning for Environmental Remote Sensing / N. Chang, K. Bai – Taylor & Francis Group LLC, 2018. – 508 p. – ISBN 978-1-4987-7433-8.
8. Stathaki T. Image Fusion: Algorithms and Applications / T. Stathaki – Elsevier Ltd., 2008. – 500 p. – ISBN: 978-0-12-372529-5.
9. Landgrebe D. Signal theory methods in multispectral remote sensing / D. Landgrebe – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2003. – 536 p. – ISBN 0471-42028-X.
10. Zheng Y. Image Fusion and Its Applications / Y. Zheng – InTech, 2011. – 242 p. – ISBN 978-953-307-182-4.
11. Xiao G. Image Fusion / G. Xiao, D. Bavirisetti, G. Liu, X. Zhang – Springer Nature Singapore Pte Ltd. and Shanghai Jiao Tong University Press, 2020. – 404 p. – ISBN 978-981-15-4866-6.
12. Moir I. Military Avionics Systems / I. Moir, A. Seabridge – John Wiley & Sons, 2006. – 544 p. – ISBN: 0-470-01632-9.
13. Павлов Н.И. Малогабаритный оптико-электронный сканирующий прибор для аэросъемки в видимом и инфракрасном диапазонах / Н.И. Павлов, Г.И. Ясинский // Оптический журнал, 2003. – Т. 70. – № 4. – С. 11–14.

14. Иванов Е.Л. Слияние изображений в многоканальной системе наблюдения местности / Е.Л. Иванов, М.С. Смагин // Датчики и системы, 2006. – № 11. – С. 6–12.
15. SOPHIE-MF Long Range Multi-Function Binoculars/Thermal Imager : [буклет] / Thales Optronique. – Франция, 2014.
16. SOPHIE-XF Third generation mid wave infrared thermal imager with continuous optical zoom and target locator : [буклет] / Thales Optronique. – Франция, 2014.
17. SOPHIE-UF Multifunction Surveillance & Target Locator : [буклет] / Thales Optronique. – Франция, 2014.
18. JIM LR Long-range multifunction cooled infrared binoculars / Safran Group. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.safran-group.com/products-services/jim-lr-long-range-multifunction-infrared-binocular>
19. Sagem's JIM LR Tactical Infrared Binoculars: covering all observation and targeting requirements / Safran Sagem // SoldierMod, 2015. – Vol. 15. – Spring/Summer. – Pp. 6–8.
20. Recon B2-FO Fully Integrated Multi-Sensor System / Flir. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.surcom.nl/wp-content/uploads/2018/07/1352285084000recon\\_b2fo.pdf](https://www.surcom.nl/wp-content/uploads/2018/07/1352285084000recon_b2fo.pdf)
21. Recon B9 Lightweight Thermal Binocular : [буклет] / Flir. – США, 2014.
22. Linx Hand Held All-Weather Target Acquisition System : [буклет] / Selex Galileo S.p.A. – Италия, 2014.
23. Exelis AN-PSQ-20A spiral enhanced night vision goggle : [буклет] / Exelis. – США, 2015.
24. SLD 500 surveillance and sniper detection laser system : [буклет] / Cilas. ArianeGroup. – Франция, 2014.
25. Прибор «Призрак-М» (ТЛС2000) : [буклет] / ТАЛЮС. – М., 2005.
26. Волков В.Г. Носимые и переносные лазерные приборы для спецтехники / В.Г. Волков // Спецтехника и связь, 2012. – № 1. – с. 2–17.
27. Мираж-1200. Прибор обнаружения оптических и оптоэлектронных систем : [буклет] / НПЦ «Транскрипт» – М., 2002.

28. U.S. Army Communications, Electronics Command // Command, Control, Communications, Computers, Intelligence & Electronic Warfare and Sensors and Information Management (C4IEWS & IM), Project Book, Fiscal Year 1998. – p.113
29. Синицын Ю.А. 1ПН106-Магнус // Точприбор: Монография в 3 т. Том 1: Оптические и оптико-электронные приборы, системы прицеливания, разведки и наблюдения для сухопутных войск – Новосибирск: Наука, 2011. – С.202–203.
30. Голицын А.В. Обнаружение точечных объектов переменной интенсивности / А.В. Голицын, А.А. Голицын // Точприбор: Монография в 3 т. Том 1: Оптические и оптико-электронные приборы, системы прицеливания, разведки и наблюдения для сухопутных войск – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 194–197.
31. Малогабаритная лазерная локационная аппаратура обнаружения оптических и оптико-электронных средств «Антиснайпер-М2» : [буклет] / МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 2004.
32. Малогабаритная лазерная локационная аппаратура «Антиснайпер» // Оружие и технологии России. Энциклопедия XXI век. Оптико-электронные системы и лазерная техника. – М.: Оружие и технологии, 2005. – Т. 11. – С. 81.
33. Дж. Ллойд. Системы тепловидения / пер. с англ. Васильченко Н.В. – М.: Мир, 1978. – 416 с.
34. Войтов В.А. Способ формирования единого информационного поля в приборе наблюдения / В.А. Войтов, А.В. Голицын, Е.В. Дегтярев, П.В. Журавлев, Г.Е. Журов, В.Б. Шлишевский // Тез. докл. совещ. «Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники» («Фотоника–2008»). – Новосибирск: ИФП СО РАН, 2008. – С. 140.
35. Войтов В.А. Способ формирования единого информационного поля в приборе наблюдения / В.А. Войтов, А.В. Голицын, Е.В. Дегтярев, П.В. Журавлев, Г.Е. Журов, В.Б. Шлишевский // Оптический журнал, 2009. – Т. 76. – №12. – С. 84–85.

36. Голицын А.В. Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения / А.В. Голицын, П.В. Журавлев, Г.Е. Журов, А.В. Корякин, А.П. Чихонадских, В.Б. Шлишевский, Т.В. Яшина // Тез. докл. совещ. «Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники» («Фотоника–2008»). Новосибирск: ИФП СО РАН, 2008. – С. 141.
37. Голицын А.В. Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения / А.В. Голицын, П.В. Журавлев, Г.Е. Журов, А.В. Корякин, А.П. Чихонадских, В.Б. Шлишевский, Т.В. Яшина // Известия ВУЗов. Приборостроение, 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 27–34.
38. Журов, Г.Е. Универсальная модульная реконфигурируемая система для обработки сигналов тепловизионных и многоканальных приборов в реальном времени / Г.Е. Журов, М. Ю. Цивинский // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 5. – С. 44–46.
39. Nauck, S. Reconfigurable computing: the theory and practice of FPGA-based computation / S. Nauck, A. Dehon. – USA, Burlington: Elsevier Inc., 2008. – 945 p.
40. Моисеев В.А. Принципы построения многоспектральных комплексированных оптико-электронных систем / В.А. Моисеев, Е.А. Терешин, Э.А. Демьянов, П.В. Журавлев, Е.О. Ульянова, К.П. Шатунов, С.М. Чурилов // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 9. – С. 51–57.
41. Burger, W. Principles of Digital Image Processing. Core Algorithms, 1st Edition / W. Burger, M. J. Burge. – Springer, 2009. – 329 p.
42. scmRTOS Операционная система реального времени [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://scmrts.sourceforge.net/files/doc/ru/scmRTOS\\_v4.ru.pdf](http://scmrts.sourceforge.net/files/doc/ru/scmRTOS_v4.ru.pdf)
43. Голицын, А.А., Тепловизионный канал на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров / А.А. Голицын, А.В. Голицын, Г.Е. Журов, М.Ю. Цивинский, С.Д. Чибурун, Т.В. Яшина // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80. – № 6. – С. 8–13.
44. Голицын А.В. Тепловизионный прицел для стрелкового оружия / А.В. Голицын, Г.Е. Журов, М.Ю. Цивинский, А.А. Голицын, Т.В. Яшина, В.А. Навражных, С.С. Мишанин // Фотоника-2011. Российская конференция и

- школа по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотозлектроники : Тезисы докладов. Новосибирск: ИФП СО РАН, 2011. – С. 148.
45. Алантьев Д.В. Стенд для исследования возможности использования матричных фотоприёмников видимого диапазона в составе активно-импульсных приборов наблюдения / Д.В. Алантьев, А.А. Голицын, А.В. Голицын, Н.А. Сейфи // Оптический журнал. – 2018. – Т. 85. – № 6. – С. 53–57.
  46. Алантьев Д.В. Портативный активно-импульсный прибор наблюдения / Д.В. Алантьев, А.А. Голицын, А.В. Голицын, Н.А. Сейфи // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 6. – С. 507–512.
  47. Ковалев, А.М. О способе отображения объектов в сферической перспективе / А.М. Ковалев // Автометрия, 2000. – № 4. – С. 76–81.
  48. Ковалев, А.М. Аберрации в ретинальных дисплеях с виртуальным сферическим экраном / А.М. Ковалев // Автометрия. – 2001. – № 1. – С. 3–14.
  49. Мультифокальный стереодисплей [Текст] : патент RU2201610C2 / А.М. Ковалев – заявл. 27.06.2001; опубл. 27.03.2003; Бюл. № 9.
  50. Грузевич Ю.К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю.К. Грузевич – М.: Физматлит, 2014. – 276 с. – ISBN 978-5-9221-1550-6.
  51. Herzberger M. The Design of Superachromatic Lenses / M. Herzberger, N. McClure // Applied Optics, 1963. – Vol. 2. – I. 6. – Pp. 553–560.
  52. Шпякин М.Г. Расчет четырехцветных тонких апохроматов / М.Г. Шпякин // Оптико-механическая промышленность, 1978. – №2. – С. 15.
  53. Объектив с переменным фокусным расстоянием [Текст] : патент RU2276800C1 / А.В. Голицын – заявл. 16.12.2004; опубл. 20.05.2006; Бюл. № 14.
  54. Голицын А.А. Повышение эффективности цифровых оптико-электронных прицелов для стрелкового оружия [Текст] : Автореф. дис. канд. техн. наук : 05.11.07 / А.А. Голицын – Новосибирск, 2018. – 18 с.
  55. Волков В. Г. Активно-импульсные приборы ночного видения / В.Г. Волков // Специальная техника, 2002. – № 3. – С. 2–11.

56. Волков В.Г. Приборы ночного видения для обнаружения бликующих элементов / В.Г. Волков // Специальная техника, 2004. – № 2. – С. 2–9.
57. Кирпиченко Ю.Р. Видеоинформационные системы наблюдения и контроля при сложных условиях видимости / Ю.Р. Кирпиченко, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 105–110.
58. Гейхман И.Л. Основы улучшения видимости в сложных условиях / И.Л. Гейхман, В.Г. Волков – М.: Недра-бизнесцентр, 1999. – 286 с.
59. Белоконев В.М. Лазерный телевизионный прибор / В.М. Белоконев, В.Г. Волков, В.Л. Саликов, Б.А. Случак // Прикладная физика, 2013. – № 4. – С. 16–22
60. Гейхман И.Л. Видение и безопасность / И.Л. Гейхман, В.Г. Волков – М.: Новости, 209. – 840 с.
61. Kamerman G.W. Laser Radar / G.W. Kamerman // The infrared & Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 6. Active Electro-Optical Systems / edit. C. S. Fox. – SPIE Optical Engineering Press, 1993. – Pp. 3–76.
62. Алешин Б.С. Оптические приборы наблюдения, обработки и распознавания объектов в сложных условиях / Б.С. Алешин, А.В. Бондаренко, В.Г. Волков, Э.С. Драб, Л.М. Цибулькин – М.: ГНИИЛС, 1999. – 139 с.
63. Карасик В.Е. Лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов. – М.: МГТУ, 2001. – 350 с.
64. Капустин, В.В. Активно импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях / В.В. Капустин, А.К. Мовчан, Е.В. Зайцева, М.И. Курячий // Транспортные системы и технологии. – 2018. Т. 4. – № 1. – С. 68–83.
65. Коронин Ю.Н. Приборы ночного видения / Ю.Н. Коронин, В.Ф. Агеев // Точприбор: Монография в 3 т. Том 1: Оптические и оптико-электронные приборы, системы прицеливания, разведки и наблюдения для сухопутных войск – Новосибирск: Наука, 2011. – С.110–128.



66. Устройство для обнаружения оптических и оптико-электронных приборов [Текст] : патент RU2239205C2 / А.В. Голицын, П.Г. Голубев, Ю.А. Сеницын, С.Д. Питик, Г.Н. Попов, И.Б. Южик – заявл. 15.07.2002; опубл. 27.10.2004.
67. Способ обнаружения средств оптического и оптоэлектронного типа [Текст] : патент RU2133485C1 / А.С. Козаков, М.И. Крымский, С.А. Михайленко, Н.Н. Слипченко, В.А. Поджуев – заявл. 03.07.1998; опубл. 20.07.1999.
68. Голицын, А.В. Повышение эффективности лазерного локатора оптических систем / А.В. Голицын // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 18–21.
69. Активно-импульсный прибор наблюдения [Текст] : патент RU2757559C1 / А.В. Голицын – заявл. 04.02.2021; опубл. 18.10.2021; Бюл. № 29.
70. Электронно-оптический преобразователь ЭПМ 44Г-А [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ooprivor.ru/?i=3881>
71. ICX249AL Diagonal 8mm (Type 1/2) CCD Image Sensor for CCIR Black-and-White Video Cameras / Sony [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/47452/SONY/ICX249AL.html>
72. Rosell F.A. Performance synthesis of electro-optical sensors / F.A. Rosell, R.H. Willson // EOTM 575, Night Vision Laboratory, U.A. Army Electronics Command, Ft. Belvoir, VA (Feb. 1975)
73. Rosell F.A. Limiting resolution of low-light-level imaging sensors / F.A. Rosell // Journal of the Optical Society of America, 1969. – Vol. 59. – Iss. 5. – pp. 539–547.
74. Rosell F.A. Performance synthesis (electro-optical sensors) / F.A. Rosell, R.H. Willson // Technical report AFAL-TR-71-137, AD 884829, Air Force Avionics Laboratory, Wright Patterson Air Force Base, OH (May 1971).
75. Bailey H.H. Target Detection Through Visual Recognition: A Quantitative Model / H.H. Bailey // Memorandum RM-6158/1-PR. – Rand Corporation, Santa Monica, Ca., Feb. 1970.
76. Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска / Н.П. Травникова – М.: Машиностроение, 1985. – 128 с.

77. Мешков В.В. Основы светотехники. Ч. 2. Физиологическая оптика и колориметрия / В.В. Мешков, А.Б. Матвеев – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.
78. Луизов А.В. Глаз и свет / А.В. Луизов – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
79. ГОСТ Р ИСО 9241-303-2013. Эргономика взаимодействия Человек-Система. Часть 303. Требования к электронным видеодисплеям. – М.: Стандартинформ, 2014. – 35 с.
80. Волков В.Г. Основы построения активно-импульсных приборов ночного видения с использованием лазерных излучателей [Текст] : Дис. докт. техн. наук : 05.27.03 / В.Г. Волков – М., 2005. – 367 с.
81. Дунаев А.С. Расчет дальности наблюдения для активно-импульсной телевизионной системы / А.С. Дунаев, В.И. Шлычков // Оптический журнал, 2005. – Т. 72. – № 4. – С. 48-51.
82. Овсянников В.А., Филиппов В.В., Дальность действия активно-импульсных систем низкоуровневого телевидения / В.А. Овсянников, В.В. Филиппов // Оптический журнал, 2007. – Т. 74. – №1. – С. 24–27.
83. Richardson, M.A. Surveillance and target acquisition systems, Second Edition / M.A. Richardson [и др]. – London: Brassey's (UK) Ltd., 1997. – 260 p.
84. Барышников Н.В. Автоматизация измерений световозвращательных характеристик / Н.В. Барышников, В.Б. Бокшанский, И.В. Животовский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". – 2004. – № 2. – С. 27–35.
85. Протопопов В.В. Инфракрасные лазерные локационные системы / В.В. Протопопов, Н.Д. Устинов – М.: Воениздат, 1987. – 174 с.
86. Круз П. Основы инфракрасной техники / П. Круз, Л. Макглоуин, Р. Макквистан; пер. с англ. В.Н. Чернышев, А.Г. Шереметьев – М.: Воениздат, 1964. – 464 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Акты об использовании результатов диссертационной работы



УТВЕРЖДАЮ  
ВРИО руководителя Филиала  
ИФП СО РАН «КТИПМ»

С. М. Чурилов

« 21 » июня 2022 г.

## А К Т

**использования результатов диссертационной работы Голицына А.В.  
«Прибор наблюдения с лазерным локационным и тепловизионным каналами»**

Результаты исследования «Прибор наблюдения с лазерным локационным и тепловизионным каналами», использованы в научно-технической деятельности Филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологического института прикладной микроэлектроники» (Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ»), а именно:

- метод совмещения изображений каналов многоканального оптико-электронного прибора в едином масштабе в едином информационном поле использован, методы обеспечения единого увеличения каналов по всему полю изображения, метод расчета широкоспектрального объектива-суперапохромата, методы повышения скорости обзора и дальности действия лазерного локационного канала использованы при выполнении НИР "Исследование принципов и путей создания перспективных оптико-электронных приборов наблюдения", шифр "Засада" и договоров поставки № 42/2006 -606/07, № 43/2006 -606/07;

- отдельные решения по построению лазерного локационного канала при выполнении НИР "Исследование возможности создания средств специальной техники на основе лазерных технологий", шифр "Новатор" и договора поставки № 594/2005;

- решения по построению тепловизионного визирного канала на основе неохлаждаемой матрицы микроболометров при выполнении ОКР "Разработка тепловизионного канала на основе микроболометрической матрицы", шифр "Континенталь-ТК", СЧ ОКР "Ратник", "Ратник-УТНр-К", СЧ ОКР "Доработка РКД тепловизионного прибора наблюдения на базе тепловизионного канала и изготовление опытных образцов тепловизионного канала", шифр "ТК-4".

Ученый секретарь  
д.т.н, доцент

А.Г. Паулиш

ФСТЭК РОССИИ

Экз. № \_\_

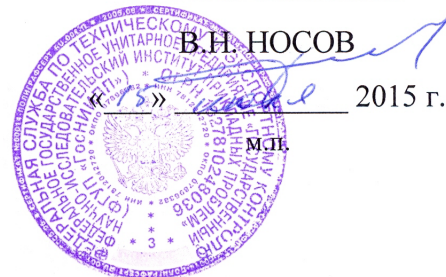
Федеральное  
государственное унитарное  
предприятие  
«Государственный научно-  
исследовательский институт  
прикладных проблем»  
(ФГУП «ГосНИИПП»)

Обводного канала набережная, д. 29  
Санкт-Петербург, 191167  
тел. (812) 274-31-56, факс (812) 274-09-31  
ОКПО 07896382, ОГРН 1027810248036  
ИНН/КПП 7812042720/784201001

№ \_\_\_\_\_  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

Врио заместителя генерального дирек-  
тора по научной работе  
ФГУП «ГосНИИПП»



## А К Т

о реализации научных результатов диссертационной работы  
ГОЛИЦЫНА Андрея Вячеславовича на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы»

Комиссия в составе:

председателя комиссии – главного научного сотрудника ФГУП  
«ГосНИИПП», доктора технических наук, старшего  
научного сотрудника А.В. Корякина

членов комиссии:

- ведущего научного сотрудника 2 центра, доктора  
технических наук, профессора А.А. Устинова
- ведущего научного сотрудника 2 центра, кандидата  
технических наук, старшего научного сотрудника  
В.Е. Шульгина

рассмотрела основные научные и практические результаты диссертационной  
работы на соискание ученой степени кандидата технических наук заведующе-  
го отделом филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Голицына А.В., а именно:

- расширение спектрального диапазона для объективов лазерно-локационных  
приборов обнаружения и наблюдения;
- метод совмещения изображений в многодиапазонных приборах обнаружения  
и наблюдения;
- метод повышения дальности обнаружения в лазерно-локационном канале оп-  
тико-электронных приборов наблюдения.



Комиссия отмечает, что рассмотренные результаты реализованы в рамках выполнения НИР «Засада» и были использованы при разработке предложений по созданию перспективных образцов оптико-электронных приборов наблюдения в ОКР «Зигзаг», «Застава».

Разработанные в НИР «Засада» приборы наблюдения прошли комплексные испытания и опытную эксплуатацию в реальных условиях применения по назначению в разных климатических зонах Северо-западного региона и Северного Кавказа. Предложенные автором технические решения позволили эффективно решать задачи круглосуточного наблюдения и обнаружения биологических объектов и образцов грунтового транспорта и судов на акватории водной поверхности. Результаты исследований также были использованы при разработке предложений и обосновании перспективных ОКР по созданию периметровых охранных систем комплексного применения.

Акт выдан для представления в диссертационный совет по месту защиты ГОЛИЦЫНА Андрея Вячеславовича.

Председатель комиссии:



А.В. Корякин

Члены комиссии:



А.А. Устинов

В.Е. Шульгин

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель директора  
ИАиЭ СО РАН  
доктор технических наук,  
профессор



\_\_\_\_\_ О.И. Потатуркин

« 17 » 11 2015 г.

### АКТ

**использования результатов диссертационной работы Голицына А. В.**  
**«Разработка и исследование малогабаритных многоканальных**  
**приборов наблюдения»**

17 ноября 2015 г.

г. Новосибирск

Настоящим актом подтверждаем, что результаты диссертационной работы Голицына А.В. «Разработка и исследование малогабаритных многоканальных приборов наблюдения» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы в части метода совмещения изображений каналов оптико-электронной системы наблюдения в едином информационном поле в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматки и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН) при выполнении НИР «Разработка и исследования программно - алгоритмических средств повышения качественных показателей разрабатываемых модулей при решении задач обнаружения и распознавания» (шифр «Полынь-А») по контракту № 6348/А от 10.03.08 г.

Заведующий лабораторией  
кандидат технических наук

С.М. Борзов



АО «Швабе – Приборы»,  
г. Новосибирск, 630049, Дуси Ковальчук ул., д. 179а

Фамилия  
Подразделение  
Телефон +7 (383) 216-07-88  
Телефакс +7 (383) 225-89-07  
+7 (383) 226-46-49  
E-Mail [post@tochpribor.com](mailto:post@tochpribor.com)

Российская Федерация

Предмет

Дата 10.03.2016  
№ 684/0071.1

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора  
по НИОКР и гражданской продукции -  
- главный конструктор  
АО «Швабе – Приборы»



И.Г. Мозеин

2015 г.

#### АКТ

**использования результатов диссертационной работы Голицына А.В.**  
**«Разработка и исследование малогабаритных многоканальных**  
**приборов наблюдения»**

« 10 » 03 2015 г.

г. Новосибирск

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Голицына А.В. «Разработка и исследование малогабаритных многоканальных приборов наблюдения» в части метода совмещения изображений каналов многоканального оптико-электронного прибора в едином масштабе в едином информационном поле использованы при выполнении НИР «Куприт».

Результаты работы в части методов повышения дальности действия лазерного локатора оптических систем использованы в ОКР по разработке приборов «1ПН106», «1ПН119» поставленных на вооружение.

Результаты разработки ряда объективов с фиксированным и сменным увеличением неохлаждаемого тепловизионного канала использованы в ОКР «Континенталь».

Методика расчета широкоспектральных объективов-суперапохроматов использована в ОКР «Миус».

Результаты теоретических и экспериментальные исследования дисперсии показателя преломления обширного набора оптических жидкостей, разработки жидкостных линз с электроуправляемой оптической силой и широкоспектральных



оптических систем на основе жидкостных линз использованы для постановки инициативной ОКР «Разработка прибора командира БТТ».

Ответственный секретарь НТС, ктн



В.Л.Парко

АО «Швабе – Приборы»

Адрес для корреспонденции:  
АО «Швабе – Приборы»  
Почтовое отделение 630049  
г. Новосибирск, Дуси Ковальчук ул., д. 179а

Адрес офиса:  
Дуси Ковальчук ул., д. 179а  
630049 г. Новосибирск  
Тел.: +7 (383) 216-07-88  
Факс: +7 (383) 225-89-07  
+7 (383) 226-46-49

Руководство:

Генеральный директор В.А. Рассохин  
Заместитель генерального директора по экономике и финансам Л.С. Булатова  
Заместитель генерального директора по НИОКР и гражданской продукции – главный конструктор И.Г. Мозеин

