

На правах рукописи



Голицын Андрей Вячеславович

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

Специальность 2.2.6 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук

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

Официальные оппоненты:

Кирьянов Валерий Павлович, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория интегрированных информационных систем управления, ведущий научный сотрудник (г. Новосибирск);

Капустин Вячеслав Валериевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра Телевидения и управления, доцент кафедры (г. Томск).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (г. Новосибирск).

Защита диссертации состоится «06» декабря 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.02, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» октября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р техн. наук, доцент



Максим Андреевич Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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 многоканальных оптико-электронных приборов (МОЭП) обычно не реализуются предельные параметры, достижимые в одноканальных приборах. 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.

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.

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 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 по многоканальным системам наблюдения и прицеливания, свойствам и преимуществам различных каналов и методам их комбинаций.

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, визирных 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. Для поиска комбинаций стекол, пригодных для ахроматизации на четырех длинах волн, использовался язык программирования Python. Аберрационные расчеты оптических систем выполнены в программе оптических расчетов Zemax.

Экспериментальные лабораторные и полевые исследования проведены на базе экспериментальных и опытных образцов, специально 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.

Методы повышения скорости обзора и дальности действия лазерного локационного канала (ЛЛК) 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 тепловизионного визирного канала (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 МОЭП.

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 ПЗС-матрицу 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.

Достоверность результатов работы и их практическая применимость подтверждена неоднократными полигонными и полевыми испытаниями разработанных каналов и 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, СТiС МВД г. Искитим.

Испытания на внешние климатические, вибрационные и ударные воздействия проводились на испытательном оборудовании КТИ ПМ, центра коллективного пользования СО РАН, Новосибирского филиала СТiС 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 абберрационных расчетах оптических систем, проведении экспериментов и испытаний.

Публикации и апробация работы

По результатам проведенного исследования в рамках настоящей работы автором опубликовано более 30 печатных работ. Основные результаты опубликованы в 7 работах в журналах, входящих в перечень ВАК, 5 статей проиндексированы в реферативных базах Scopus и Web of Science.

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 взрывобезопасности и противодействия терроризму", г. Санкт-Петербург, 2013.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит общую характеристику работы – сведения об актуальности и степени разработанности темы исследования, целях и задачах, научной новизне, теоретической и практической значимости работы, методологии и методах исследования, положениях, выносимых на защиту, апробации результатов и степени их достоверности.

В первой главе сделан обзор современного состояния ручных и переносных МОЭП. Типичный МОЭП имеет два визирных канала – тепловизионный и телевизионный. Большинство приборов производится в виде линеек моделей, в которых базовый прибор может дополняться приемником спутниковой навигации, цифровым компасом, инклинометрами и лазерным дальномером. Приборы ведущих производителей FLIR, SAGEM, Thales имеют варианты с криогенными и термоэлектрическими охлаждаемыми, а также неохлаждаемыми тепловизионными каналами.

Не обнаружен ни один зарубежный ручной МОЭП, предоставляющий совмещенное в едином масштабе изображение визирных каналов на микродисплее. Единственный прибор, выдающий совмещенное в едином масштабе изображение канала ночного видения и тепловизионного канала, – AN/PSQ-20A компании ITT Exelis, США – относится к классу нашлемных и обеспечивает эту задачу оптическим совмещением изображений в окуляре.

Не обнаружен, также, ни один ручной МОЭП, содержащий лазерный канал локации оптико-электронных приборов (кроме МОЭП, разработанного под руководством соискателя).

Во второй главе рассматривается метод организации единого информационного поля МОЭП. Объединение изображений каналов в едином информационном поле затруднено следующими техническими проблемами:

- различные форматы фотоприемных матриц 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 (дисторсия);
- различное изменение масштабов каналов в температурном диапазоне эксплуатации.

Для сегодняшних тепловизионных фотоприемных матриц характерны форматы 384×288, 640×480 и 1024×768, а для телевизионных 752×582, 1280×960, 1932×1452 и более. При этом, формат вывода ограничивается микродисплеем, для которого доступны форматы 800×600 и 1280×1024. Очевидно, что доступные форматы изображений в среднесрочной перспективе, будут расти, но отрыв в форматах более массовых и технологически простых кремниевых матриц видимого и ближнего ИК диапазона от тепловизионных матриц будет сохраняться. Очевидно также, что дальность действия и поле зрения для прибора наблюдения, являются основными характеристиками и, соответственно, определяющими постоянный спрос на увеличение формата, при разумной стоимости и доступности фотоприемников. При этом, даже ограниченность формата микродисплея не является причиной отказываться от максимально доступных форматов, поскольку максимальные дальность действия и поле зрения могут быть реализованы при электронном масштабировании изображения.

Соискателем разработан метод совмещения изображений на экране дисплея в едином масштабе, оптимальный для ручных и переносных МОЭП с ограниченным энергопотреблением. Способ заключается в согласовании углового размера пикселей или групп пикселей двух или более каналов в вертикальном направлении при габаритном расчете оптических систем, а в горизонтальном направлении – средствами fusion-процессора изображений.

Рассмотрим этот метод на примере двух визирных каналов, один из которых содержит телевизионную матрицу, а другой тепловизионную, примерно вдвое меньшего разрешения (рис. 1). Пиксель телевизионной матрицы отображается на пиксель микродисплея как есть, без пространственных преобразований. Пиксель тепловизионного изображения вдвое превосходит по угловому размеру пиксель телевизионного изображения и представляется четырьмя пикселями (2×2) экрана микродисплея. Это условие обеспечивается габаритным расчетом оптических систем каналов.

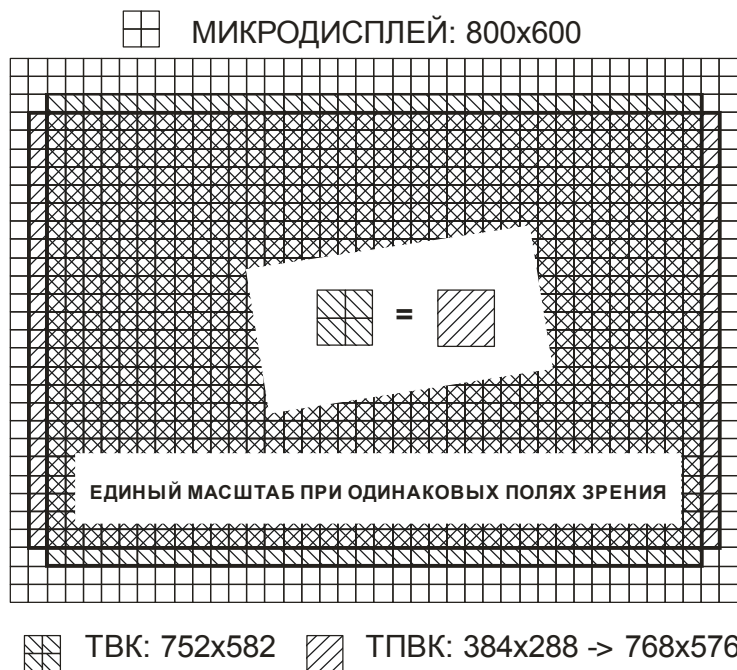


Рисунок 1 – Способ совмещения изображений ТПВК и ЛЛК

Если оптические системы каналов состоят только из приемных объективов, то условие обеспечивается соответствующей пропорцией шага элементов матриц к фокусному расстоянию:

$$2 \cdot a_{\text{ТВ}} / f_{\text{ТВ}} = a_{\text{ТПВ}} / f_{\text{ТПВ}}$$

где $a_{\text{ТВ}}$, $a_{\text{ТПВ}}$ – шаг элементов телевизионной и тепловизионной матриц, $f_{\text{ТВ}}$, $f_{\text{ТПВ}}$ – фокусные расстояния каналов. Такой метод позволяет примерно сбалансировать поля зрения и дальности действия каналов, а также обеспечить единый масштаб изображения.

Вопрос полей зрения достаточно очевиден из пропорций форматов матриц, а вот дальности действия каналов требуют дополнительного рассмотрения. Тепловизионный диапазон, в силу яркого свечения интересующих активных объектов, для распознавания ростовой фигуры или бронетехники легко обходится 5-6 строками изображения, в то время как для телевизионных изображений требуется не менее 4 пар штрихов, согласно критерию Джонсона. При этом, вероятность того, что 4 пары штрихов в достаточной мере будут обеспечены 8 строками растрового изображения (минимальное значение, согласно критерию Найквиста), зависит от характеристик оптической системы, естественной окружающей освещенности и контраста цели и фона.

Камуфляж цели на фоне хвойного леса способен сократить дальность распознавания (а, соответственно, и ужесточить пространственный критерий распознавания) на полпорядка, при вполне достаточной освещенности.

При решении задачи обнаружения, пропорция еще более резкая. Где тепловизионному каналу бывает достаточно и одного яркого пикселя, дальность обнаружения ночного или телевизионного канала может соответствовать его 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 третьей главе описываются методы и средства обеспечения единого масштаба в процессе проектирования, производства и эксплуатации, исследованные на макетном образце с тепловизионным и лазерным локационным каналами (ЛЛК).

Для получения телевизионного изображения с экрана электронно-оптического преобразователя (ЭОП) $\varnothing 18$ мм ЛЛК, необходима проекционная система с увеличением, обеспечивающим вписывание диагонали фотоприемной матрицы в изображение экрана ЭОП в плоскости матрицы (рис. 2). Требуемое увеличение для полудюймовой ПЗС-матрицы форматом 582×752 с диагональю 8 мм составляет $\sim 0,448^{\times}$. Таким образом, при определении пропорций фокусных расстояний приемных объективов, следует учесть наличие проекционной системы.

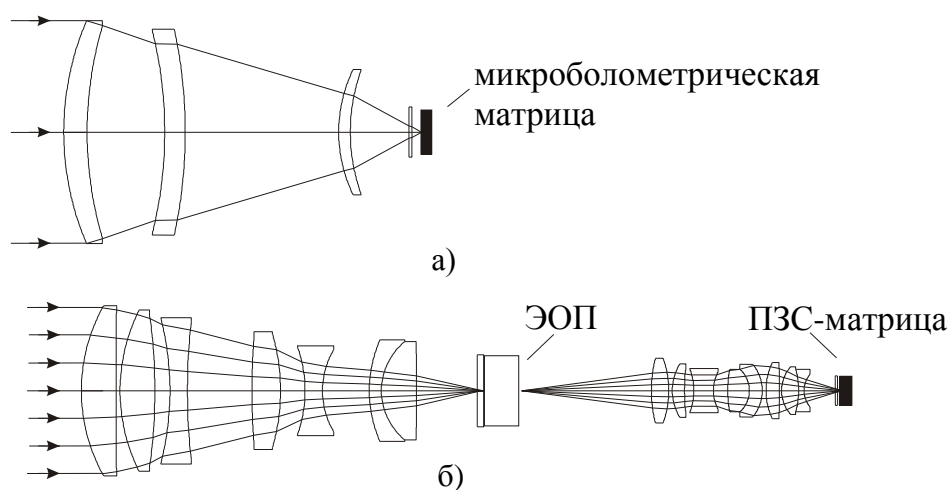


Рисунок 2 – Оптическая схема приемных блоков ТПВК (а) и ЛЛК (б)

Для обеспечения единого вертикального углового размера элемента микроболометрической матрицы с шагом 35 мкм, при фокусном расстоянии объектива ТПВК 80 мм (определяемым компромиссом между дальностью распознавания, полем зрения и массогабаритными характеристиками, приведенным к ближайшему значению, обеспечивающему разумный угловой размер пикселя, для разметки шкал в тысячных, миллирадианах или угловых минутах), фокусное расстояние приемного объектива ЛЛК, для ПЗС-матрицы с вертикальным шагом 8,3 мкм составит 85 мм.

Кроме выравнивания увеличения по вертикали, существует проблема различных пропорций фоточувствительных элементов микроболометрической и телевизионной матриц в вертикальном и горизонтальном направлениях. Элементы микроболометрической матрицы имеют одинаковый шаг 35 мкм, а телевизионной матрицы –различный: 8,3 мкм и 8,6 мкм. Эта проблема в макете решается изменением пропорции пикселей по горизонтали с 1 : 2 на более

точную, например 17 : 33. Технически такая пропорция достигается за счет того, что каждый столбец тепловизионного канала с номером, кратным семнадцати, соответствует не двум, как все остальные, а одному столбцу телевизионного канала. Дополнительная регулировка электронного увеличения в горизонтальном направлении, в небольших пределах, позволяет компенсировать технологические допуски изготовления и разницу в температурных зависимостях фокусных расстояний объективов каналов. Она может применяться как в процессе настройки МОЭП, так и в ходе эксплуатации.

Сформированный таким образом геометрический масштаб изображения искажают дисторсии объективов и проекционной системы. Значения дисторсий должны быть ограничены и согласованы на этапе абберационного расчета оптических систем. В разработанном макете расчетная дисторсия для объектива ТПКВ и проекционной системы ЛЛК составила менее 0,2%, а для объектива ЛЛК – менее 0,5% (рис. 3), причем, что важно, для обоих объективов дисторсия имеет один знак (отрицательная). При достигнутых значениях дисторсий, максимальное расхождение изображений каналов, по краю поля микродисплея, не превышает размера одного элемента изображения тепловизионного канала (2×2 пикселя).

Еще одна проблема в выравнивании масштабов каналов возникает на этапе изготовления оптических систем, которые, вследствие неизбежных технологических допусков, будет иметь фокусные расстояния, несколько отличающиеся от расчетных.

Для дополнительного согласования масштаба один из каналов должен иметь возможность коррекции увеличения в пределах нескольких процентов. 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.

Использованный метод обеспечил полное совмещение положения и масштабов изображения ТПКВ и ЛЛК при минимальном расходе вычислительных ресурсов и энергии. Полное энергопотребление макетного образца МОЭП (рис. 4) с тепловизионным и лазерным локационным каналами, процессором изображения тепловизионного канала, fusion-процессором, двумя микродисплеями и платой выдачи изображения на внешний компьютер по Ethernet составило 8 Вт.

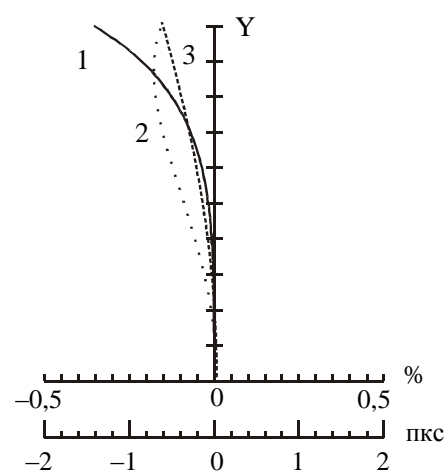


Рисунок 3 – Дисторсия: (1) объектив ЛЛК, (2) проекционная система ЛЛК, (3) ТПКВ



Рисунок 4 – Макетный образец двухканального прибора наблюдения

Дополнительные требования к объективам являются реализуемыми и не влекут потери пространственного разрешения и дальности действия. Объектив ТПВК с $f = 80$ мм и относительным отверстием 1:1 реализован на трех линзах и имеет расчетный диаметр абберационного пятна рассеяния точки менее дифракционного предела 25 мкм и шага матрицы 35 мкм.

Объектив ЛЛК с $f = 85$ мм исправлен на хроматизм положения на четырех длинах волн при чрезвычайно высоком относительном отверстии для суперапохроматов 1:2 и расчетном абберационном пятне (1–2 мкм по полю), меньшем дифракционного предела разрешения и шага каналов микроканальной пластины ЭОП (7 мкм).

Расчетное абберационное пятно проекционной системы до 2 мкм также существенно меньше шага фотоприемной матрицы 8 мкм и изображения каналов микроканальной пластины 3 мкм.

В четвертой главе описывается модификация метода расчета приемного объектива-суперапохромата лазерного локационного канала. К объективу ЛЛК предъявляются жесткие требования по исправлению хроматизма положения. Для работы в режиме пассивного низкоуровневого ТВ канала, а также для четкого отображения фона при поиске цели, объектив должен обеспечивать высокое качество в спектральном диапазоне 0,45–0,85 мкм (ЭОП поколения 2+ с фотокатодом S25), а, для максимальной дальности обнаружения ретроотражающей цели, должен иметь наилучшее качество изображения на длине волны лазерной фары 0,83 мкм.

Ахроматизация в широком спектральном диапазоне 0,45–0,85 мкм влечет расчет объектива с исправленным хроматизмом положения на четырех длинах волн. Существующие фотографические объективы-суперапохроматы телескопов ограничены относительным отверстием порядка 1:5 и видимым спектральным диапазоном, что указывает на сложность задачи, даже без учета дополнительных требований по ограничению дисторсии. Задача выбора стекол для ахроматизации на четырех длинах волн решена на базе метода Герцбергера, расширенного в части ИК диапазона, с соответствующим переопределением частных дисперсий стекол, использованием электронных каталогов оптических

материалов и автоматизации поиска комбинаций материалов, удовлетворяющих требованиям метода.

Полученный в результате расчета по модифицированному методу объектив $f' = 85$ мм исправлен на хроматизм положения на четырех длинах волн при чрезвычайно высоком относительном отверстии для суперапохроматов 1:2 и расчетном абберационном пятне (1–2 мкм по полю) менее диффракционного предела разрешения и шага каналов микроканальной пластины ЭОПа (7 мкм). График расчетного хроматизма положения (рис. 5) демонстрирует характерную для суперапохромата W-образную кривую.

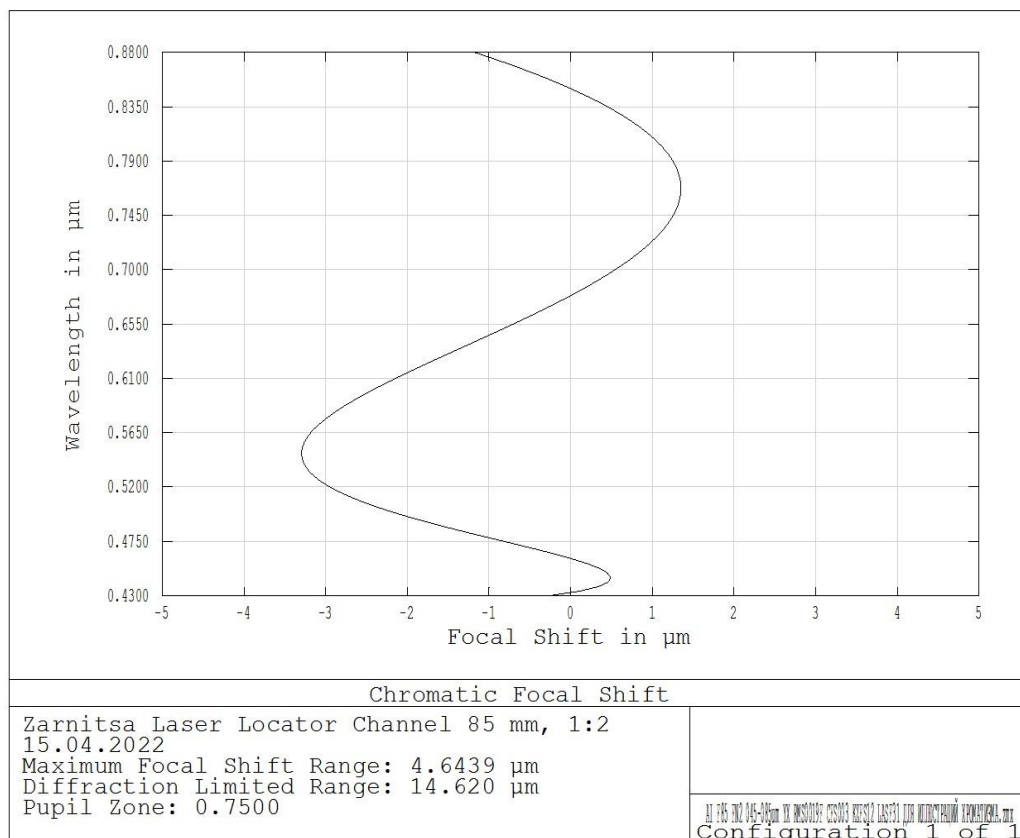


Рисунок 5 – Расчетный хроматизм положения в диапазоне 0,43–0,88 мкм

Пятая глава посвящена методам повышения эффективности лазерного локационного канала (ЛЛК). ЛЛК предоставляют возможность обнаружения замаскированных ОЭП разведки и прицеливания (за счет наблюдения бликов – откликов, формируемых в результате ретроотражения зондирующего лазерного излучения) на дальностях недоступных другим каналам и, на взгляд автора, существенно повышают характеристики МОЭП как системы.

Основная решаемая проблема заключается в слабых поисковых характеристиках, малой дальности действия и значительном энергопотреблении ЛЛК. В работе исследуются методы повышения характеристик ЛЛК до уровня, оправдывающего его включение в состав МОЭП.

Способность активно-импульсного принципа видения подавлять фон пропорционально скважности открытия оптико-электронного затвора позволяет

поднять дальность обнаружения оптикой системой локации, в зависимости от окружающей освещенности, в несколько раз. Недостатком классического активно-импульсного 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). Поскольку оптическая цель не является неподвижной, а решает свои собственные задачи, нетрудно прийти к выводу, что использование классического активно-импульсного принципа в локации оптикой поднимает дальность обнаружения цели, но понижает скорость поиска и вероятность обнаружения цели за ограниченное время.

Первый метод, позволяющий повысить скорость поиска цели ЛЛК – автоматическое сканирование пространства по дальности в задаваемых границах.

Полный просмотр пространства по дальности может осуществляться в темпе поступления 25-50 кадров/с. Задавая границы в пределах глубины одного строка дальности, получаем максимальное отношение сигнал/фон (соответствующее ручному сканированию по дальности), а, задавая максимальную глубину просматриваемого пространства, – минимальное отношение сигнал/фон, как при наблюдении с непрерывной фарой равной мощности. Задача оператора – учитывая топографическую дальность видения и тактические факторы, установить границы автоматического сканирования для достижения максимального отношения сигнал/фон при обеспечении просмотра всей наблюдаемой сцены.

Метод обеспечивает компромиссное повышение наблюдаемого отношения сигнал/фон в 60 раз по отношению к непрерывной зондирующей подсветке, на дальности наблюдения от 0 до 1000 м, при равной скорости поиска. Расчетная зависимость повышения наблюдаемого отношения сигнал/фон, по отношению к локационному каналу с непрерывно излучающей фарой, в функции глубины сканируемого пространства, представлена на графике (рис. 6).

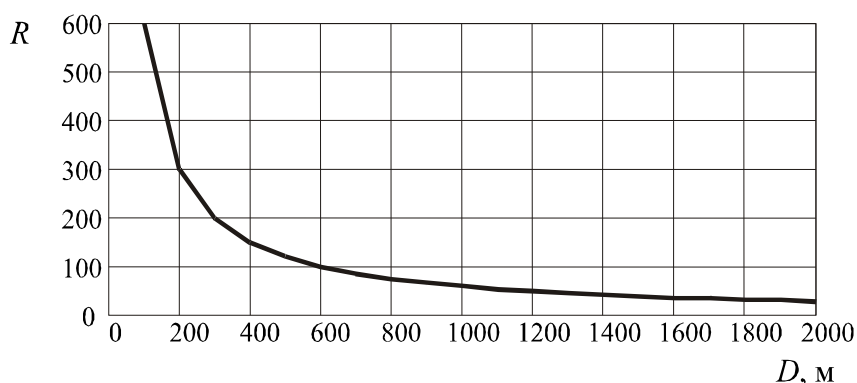


Рисунок 6 – Повышение отношения сигнал/фон при импульсной подсветке по сравнению с непрерывной, в зависимости от глубины сканируемого пространства

Ресурс для второго усовершенствования заключен в избыточности мощности фары на ближних дистанциях. Для больших дистанций мощность мала, для малых избыточна.

Соискателем разработан и испытан способ восполнить недостаток мощности на дальних дистанциях за счет ближних. 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 ("внимание" системы "фара–затвор").

Распределение импульсов по дальности, обеспечивающее равную яркость равных целей на всей глубине зондируемого пространства, может либо дополнительно повысить яркость наиболее удаленных целей в 4 раза, в одних и тех же границах автоматически сканируемой дальности, либо повысить максимальную дальность обнаружения в $4^{1/4} \approx 1,4$ раза. Например, при частоте лазерных импульсов 5 кГц и частоте кадров приемного канала 25 Гц на один кадр приходится 200 импульсов фары, которые можно распределить по зонам дальности (рис. 7) не одинаково.

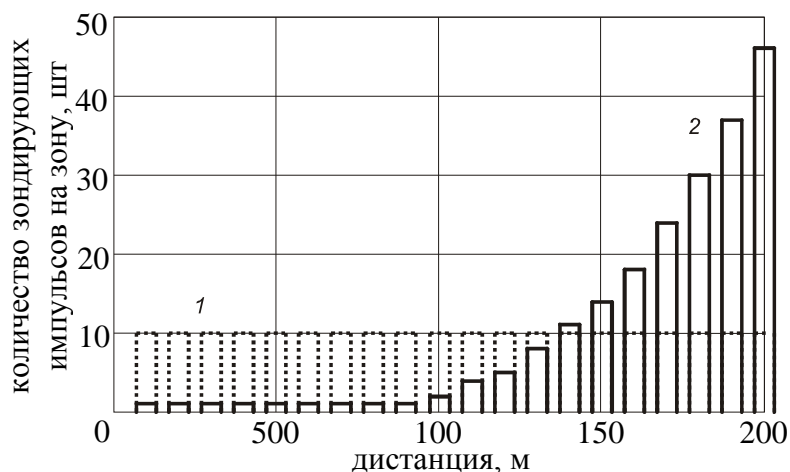


Рисунок 7 – Гистограммы равномерного распределения (1) и оптимального распределения (2) импульсов по дальности

Гистограммы равномерного (1) и пропорционального 4-й степени (2) распределения импульсов по 100-метровым зонам дальности от 100 до 2000 м, демонстрируют, что второе распределение дает выигрыш в средней энергии ретроотраженного сигнала на максимальной дистанции в 4,6 раза. Два описанных метода комбинируются с соответствующим умножением выигрыша.

Применение предложенных методов позволяет обнаружить прицел класса ПСО-1 в условиях яркого солнечного дня (естественная окружающая освещенность 100 000 люкс) на дистанции до 500 метров. В ночных и сумеречных условиях дальность обнаружения превосходит километр.

Без использования предложенных методов задача невыполнима, поскольку использование непрерывной зондирующей подсветки ограничивает дальность обнаружения в дневных условиях сотней метров, а импульсная подсветка при ручном сканировании пространства по углам и дальности исключает обнаружение цели в разумное время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации:

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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. 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.

Test stand to evaluate the possibility of using visible-light photodetector arrays as a part of active pulsed observation devices / D.V. Alant'ev, A.A. Golitsyn, **A.V. Golitsyn**, N.A. Seyfi // Journal of Optical Technology. – 2018. – Vol. 85. – Issue 6. – Pp. 355–358. (проиндексирована в Scopus / в Web of Science)

2. Способ активно-импульсного видения с электронным затвором на ССД-фотоприемнике / Д.В. Алантьев, А.А. Голицын, **А.В. Голицын**, А.Г. Паулиш, Н.А. Сейфи, С.Д. Чибурун // Письма в журнал технической физики. – 2018. – Т. 44. – № 13. – С. 3–9.

Alantev D.V. Gated-Viewing System with an Electronic Shutter on a CCD Image Sensor / D.V. Alantev, A.A. Golitsyn, **A.V. Golitsyn**, A.G. Paulish, N.A. Seyfi, S.D. Chiburun // Technical Physics Letters. – 2018. – V. 44. – Issue 7. – Pp. 555–557. (проиндексирована в Scopus / в Web of Science)

3. 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.

4. Тепловизионный канал на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров / Голицын А.А., **Голицын А.В.**, Журов Г.Е., Цивинский М.Ю., Чибурун С.Д., Яшина Т.В. // Оптический журнал. – 2013. – Т.80. – № 6. – С. 8–13.

Thermal-vision channel based on an uncooled array of microbolometers / A.A. Golitsyn, **A.V. Golitsyn**, G.E. Zhurov, M.Yu. Tsivinskiĭ, S.D. Chiburun, T.V. Yashina // Journal of Optical Technology. – 2013. – Vol. 80. – Issue 6. – Pp. 335–338. (проиндексирована в Scopus / в Web of Science)

5. Повышение эффективности лазерного локатора оптических систем / **А.В. Голицын** // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 18–21.

6. Псевдобинокулярный двухканальный прибор обнаружения потенциальных угроз / **А.В. Голицын**, П.В. Журавлев, Г.Е. Журов, А.В. Корякин, А.П. Чихонадских, В.Б. Шлишевский, Т.В. Яшина // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 27–34.

7. Способ формирования единого информационного поля в приборе наблюдения / В.А. Войтов, **А.В. Голицын**, Е.В. Дягтерев, П.В. Журавлев, Г.Е. Журов, В.Б. Шлишевский // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 12. – С. 84–87.

Method of forming a unified information field in an observational device / V.A. Voitov, **A.V. Golitsyn**, P.V. Zhuravlev, G.E. Zhurov, E.V. Degtyarev, V.B. Shlishevskii // Journal of Optical Technology. – 2009. – Vol. 76. – Issue 12. – Pp. 799–801. (проиндексирована в Scopus / в Web of Science)

Публикации в сборниках материалов конференций, индексируемых в международных реферативных базах:

8. Optimization of CCD-based gated-viewing system for low illumination conditions / N.A. Seyfi, A.A. Golitsyn, **A.V. Golitsyn** // In proc. 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2019. – Pp. 313–316. (проиндексирована в Scopus / в Web of Science)

Патенты РФ:

9. Активно-импульсный прибор наблюдения : пат. RU2757559C1 / **А.В. Голицын**. – заявл. 04.02.2021; опубл. 18.10.2021. Бюл. № 29.
10. Проекционный светосильный телецентрический объектив : пат. RU2385476C1 / Т.Н. Хацевич, **А.В. Голицын**, П.В. Журавлев. заявл. 21.07.2008; опубл. 27.03.2010; Бюл. № 9.
11. Проекционный светосильный объектив : пат. RU2371744C1 / **А.В. Голицын**, Т.Н. Хацевич, П.В. Журавлев. – заявл. 07.08.2008; опубл. 27.10.2009; Бюл. № 30.
12. Инфракрасный объектив с переменным фокусным расстоянием : пат. RU2348954C1 / Т.Н. Хацевич, **А.В. Голицын**, П.В. Журавлев. – заявл. 25.06.2007; опубл. 10.03.2009; Бюл. № 7.
13. Объектив с переменным фокусным расстоянием : патент RU2276800C1 / **А.В. Голицын**. – заявл. 16.12.2004; опубл. 20.05.2006; Бюл. №14.
14. Устройство для обнаружения оптических и оптико-электронных приборов (варианты) : 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.
15. Устройство для обнаружения оптических и оптико-электронных приборов : патент RU38408U1 / **А.В. Голицын**, П.Г. Голубев, Ю.А. Сеницын, С.Д. Питик, Г.Н. Попов, И.Б. Южик. – заявл. 24.12.2003; опубл. 10.06.2004.

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. Тел./факс. (383) 346-08-57.
Формат 60×84/16, объем 1.25 п.л., тираж 100 экз.
Заказ № Р-01324. Подписано в печать 23.09.2022 г.