

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

На правах рукописи



Голицын Александр Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИЦЕЛОВ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ**

Специальность 05.11.07

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

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

Новосибирск – 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ ПРИЦЕЛИВАНИЯ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ.....	13
1.1 Особенности цифровых прицелов для стрелкового оружия и их отличия от прицелов остальных типов	13
1.2 Обзор существующих цифровых прицелов для стрелкового оружия.....	21
1.3 Общие недостатки существующих цифровых прицелов.....	32
1.4 Выводы по результатам первого раздела	33
2 РАЗРАБОТКА НОВЫХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЦИФРОВОГО ПРИЦЕЛА И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	35
2.1 Модуль электроники: выбор фотоприемника	35
2.2 Модуль электроники: архитектура и схемотехника аппаратной части	42
2.3 Организация управления питанием прибора	56
2.4 Конструкция модуля электроники	61
2.5 Программная часть модуля электроники	65
2.6 Преобразование изображений	82
2.7 Объектив	94
2.8 Устройство отображения, конструкция окуляра	99
2.9 Выводы по результатам второго раздела	105
3 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРИЦЕЛОВ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ.....	107
3.1 Наблюдение малоразмерных объектов.....	107
3.2 Органы управления для ввода поправок	112
3.3 Индикация наличия сваливания оружия	123
3.4 Прицельная сетка и индикация параметров прибора.....	130
3.5 Выверка прицела	133

3.6 Выводы по результатам третьего раздела	136
4 ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЦИФРОВОГО ПРИЦЕЛА	137
4.1 Проверка устойчивости прибора к воздействиям внешней среды	138
4.2 Определение дальности распознавания и обнаружения.....	145
4.3 Определение чувствительности прицела в сравнении с приборами-аналогами	147
4.4 Оценка эксплуатационных свойств и тактико-технических характеристик	148
4.5 Выводы по результатам четвертого раздела	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	157
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	158
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ А	173

ВВЕДЕНИЕ

Диссертация посвящена разработке цифрового прицела для стрелкового оружия и исследованию способов повышения эффективности применения подобных приборов.

Актуальность темы исследования

Стрелковое оружие – это основной вид вооружения любой армии мира или силовой структуры. Эффективность использования оружия зависит от нескольких факторов, среди которых не малую роль играет установленное на оружии прицельное приспособление, используемое для наведения оружия на цель. От используемого прицела зависит дальность эффективной стрельбы, количество выстрелов, необходимое для поражения цели, способность либо неспособность вести огонь в заданных условиях и некоторые другие факторы, которые определяют наличие или отсутствие технического преимущества перед противником.

В настоящее время существует несколько типов прицелов для стрелкового оружия: механические прицельные приспособления, оптические прицелы [1–3], прицелы ночного видения [4], тепловизионные прицелы и цифровые прицелы видимого диапазона, принцип действия которых основан на преобразовании оптического изображения в электрические сигналы с последующей их цифровой обработкой и отображением на дисплее [5].

Конструктивно цифровой прицел напоминает собой цифровую видеокамеру, с той лишь разницей, что прицел имеет крепление для установки на оружие, на дисплее прибора помимо наблюдаемых объектов отображается также прицельная шкала, а сам прибор является устойчивым к ударным нагрузкам и обладает свойством «несбиваемости» – расположение и ориентация объектива и фотоприемника прибора относительно оружия после выстрела не изменяются. Впервые подобные приборы были предложены в середине XX века, однако не получили распространения из-за невозможности их производства, обусловленной

несовершенством существовавшей на тот момент элементной базы. несовершенство заключалось в относительно больших массогабаритных характеристиках, относительно большом энергопотреблении, не позволяющих применять ее в носимых приборах.

Известно, что мировой рынок оптических и оптико-электронных технологий последние 10–15 лет развивается очень высокими темпами (ежегодные темпы роста более 15% в год), а оптическая и оптико-электронная техника занимает одно из ведущих мест в ряду высоких новейших технологий [6]. Постоянное совершенствование элементной базы позволяет реализовывать новые схемотехнические решения в устройствах получения и обработки изображений, обладающие большей производительностью и меньшим энергопотреблением, и в последнее время цифровые прицелы получают все большее распространение.

Степень разработанности темы исследования

В зарубежной литературе возможность использования видеокамер в качестве прицельных приспособлений для стрелкового оружия описывается с 1960 годов, в основном в научно-популярных журналах в разделах, посвященных экипировке и оружию будущего.

С появлением новой элементной базы с середины 1990-х годов одновременно с появлением цифровых фото- и видеокамер во многих странах стали финансироваться программы, в рамках которых разрабатывались цифровые прицельные системы, например, программы Land Warrior (США), IdZ (Германия), FIST (Великобритания), COMFUT (Испания), IMESS (Швеция), FELIN (Франция) и позднее Uhlan 21 (Польша), F-Insas (Индия), Ратник (Россия).

В тоже время начался выпуск отдельных опытных и макетных образцов цифровых прицелов, и приборы начали описываться в литературе [7–10]. Помимо прицелов, в литературе также приводятся описания низкоуровневых телекамер, способных вести наблюдение в условиях малой освещенности [11–13].

Выпускаемые серийно образцы цифровой прицельной техники регулярно демонстрируются на выставках. Примеры существующих приборов приведены в [14, 15]. Отдельные узлы оптико-электронной прицельной техники описываются в [3, 16]. Существует также ряд патентов на цифровые прицельные системы и их отдельные узлы или элементы конструкции [17–23] и патенты на варианты реализации управления приборами [24–26].

В настоящее время существует несколько типов цифровых прицелов для стрелкового оружия, предлагаемых отечественными и зарубежными производителями (ANT, Elcan, Dedal, Пульсар, НПЗ и др). Помимо достоинств они обладают рядом недостатков [5], среди которых:

- сложность управления прибором из-за большого числа функций-регулировок и настроек прибора, необходимости настройки прибора для работы в конкретных условиях вручную;
- трудность выверки прицела;
- недостаточная чувствительность прибора при наблюдении в условиях низкой освещенности;
- усталость глаза стрелка при длительном использовании прицела;
- большое время прицеливания по малоразмерным целям.

Цели и задачи диссертационной работы

Цель диссертационной работы – разработка адаптивных цифровых оптико-электронных прицелов для стрелкового оружия, обеспечивающих высокую информативность поля зрения и методов повышения кучности и точности стрельбы, в том числе по малоразмерным объектам на предельной дальности.

Для достижения поставленной цели в ходе выполнения диссертации были выполнены следующие задачи:

- разработать метод адаптации оптико-электронного прицела к меняющимся условиям наблюдения и исследовать его эффективность на основе созданного макетного образца;

- разработать и исследовать методы повышения информативности поля зрения прибора.
- разработать методы повышения эффективности стрельбы по малоразмерным объектам на предельной дальности;
- разработать и исследовать методы повышения точности и кучности стрельбы.

Научная новизна

1. Впервые предложен способ обработки изображения, позволяющий вести наблюдение в условиях изменяющейся яркости наблюдаемой обстановки.
2. Впервые разработан способ учета поправок путем смещения изображения относительно неподвижной прицельной марки, расположенной по центру дисплея, благодаря чему увеличивается информативность поля зрения прибора.
3. Впервые предложен и исследован алгоритм сглаживания изображения, увеличенного электронным способом, применение которого приводит к повышению кучности и точности стрельбы по малоразмерным объектам на предельной дальности.
4. Впервые разработан и исследован метод повышения кучности и точности стрельбы путем индикации наличия бокового наклона.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке методов увеличения информативности поля зрения цифрового прицела благодаря обработке изображения в условиях изменяющейся яркости наблюдаемой обстановки и учету поправок путем смещения изображения относительно неподвижной прицельной марки, расположенной по центру дисплея, а также в разработке способов повышения точности и кучности стрельбы. Результаты исследования могут быть использованы при создании перспективных цифровых прицелов видимого диапазона и тепловизионных прицелов.

Методология и методы исследования.

Для достижения цели и решения поставленных задач использовались: теоретические, экспериментальные, численные методы исследования, статистическая обработка результатов лабораторных и полигонных испытаний макета цифрового оптико-электронного прицела. При разработке основных элементов макета цифрового прицела использовались системы автоматизированного проектирования электрических схем и печатных плат, системы автоматизированного проектирования и расчета оптических систем, программная платформа для верификации и отладки проектов на языках описания аппаратуры, а также среды разработки программного обеспечения для сигнальных процессоров, микроконтроллеров и программируемых логических интегральных схем.

Положения, выносимые на защиту

1. Применение способа обработки изображения, позволяющего вести наблюдение в условиях изменяющейся яркости наблюдаемой обстановки.
2. Способ выверки прицела и учета поправок путем смещения изображения относительно неподвижной прицельной марки.
3. Алгоритм сглаживания изображения, увеличенного электронным способом, приводит к повышению кучности и точности стрельбы по малоразмерным целям на предельной дальности.
4. Повышение кучности стрельбы для стрелков начального уровня подготовки за счет применения в цифровом прицеле индикации бокового наклона

Личный вклад

Все основные результаты, выводы и научные положения, приведенные в диссертационной работе, получены лично соискателем. Из десяти статей по теме диссертации, опубликованных в журналах из перечня ВАК, пять опубликованы

без соавторов, в остальных статьях вклад соискателя составляет не менее 70%, среди них постановка задач исследований, проведение экспериментов, обработка результатов экспериментов.

Степень достоверности

Достоверность исследования обеспечена согласованностью расчетов с результатами экспериментов, достаточным объемом полученных экспериментальных результатов, использованием устоявшихся, апробированных исследовательских процедур. Результаты исследований опубликованы в десяти рецензируемых журналах и докладывались на различных семинарах и конференциях. Результаты исследований используются в научно-технической научно-производственной деятельности ИАиЭ СО РАН и Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ».

Апробация работы

Промежуточные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– XXII международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 2012. Тема доклада: «Цифровой визирный канал круглосуточного прибора наблюдения»

– Молодежная конкурс-конференция «Фотоника и оптические технологии». Новосибирск, 2012. Тема доклада: «Модуль управления ПЗС-фотоприемником, совмещенный с модулем обработки полученного изображения, на базе программируемой логической интегральной схемы»

– V всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Информационные технологии и технический дизайн в профессиональном образовании и промышленности». Новосибирск, 2013. Тема доклада: «Механизм ввода поправок в прицельный знак цифрового прицела»

- Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск, 2013. Тема доклада: «Устройство ввода поправок в прицельный знак электронного прицела»
- 19-ая всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых ВНКСФ-19. Архангельск, 2013. Тема доклада: «Аппаратно-программный комплекс получения и обработки изображения в реальном времени для переносимого прибора наблюдения или прицела»
- 8-ая всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму». С.Петербург, 2013. Тема доклада: «Цифровые прицелы для стрелкового оружия: их преимущества и недостатки»
- IV всероссийская научно-техническая конференция «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники». Владимир, 2014. Тема доклада: «Применение в цифровых прицелах фотоприемников с избыточным разрешением»
- 9-ая всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму». С.Петербург, 2014. Тема доклада: «Обзор современных цифровых прицелов для стрелкового оружия»
- XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Наука Промышленность Оборона». Новосибирск, 2015. Тема доклада: «О необходимости применения алгоритма сглаживания при электронном увеличении изображения в составе цифровых и тепловизионных прицельных комплексов»
- 21-ая всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-21. Омск, 2015. Тема доклада: «Применение ретинальных дисплеев в составе оптико-электронных приборов наблюдения и прицельных комплексов»
- Российская конференция по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «Фотоника-2015». Новосибирск, 2015. Тема доклада:

«Реализация алгоритма кусочно-линейного изменения контрастности изображения в приборах наблюдения»

– XXII всероссийская конференция студентов физиков и молодых ученых ВНКСФ-22. Ростов-на-Дону, 2016. Тема доклада: «Применение в составе цифровых прицельных комплексов фотоприемников с избыточным разрешением»

– XII Международный Научный Конгресс. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск, 2016. Тема доклада: «Использование в составе цифрового прицела фотоприемника с избыточным разрешением»

– XVII Всероссийская научно-техническая конференция «Наука Промышленность Оборона». Новосибирск, 2016. Тема доклада: «Варианты и способы совершенствования цифровых прицелов для стрелкового оружия»

– XIX Всероссийская научно-техническая конференция Современные проблемы радиоэлектроники. Красноярск, 2016. Тема доклада: «Применение в составе цифровых прицелов фотоприемников с избыточным разрешением»

– XXIV международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва, 2016. Темы докладов: «Применение алгоритмов сглаживания электронно увеличенного изображения в составе цифровых и тепловизионных прицельных комплексов» и «Реализация алгоритма кусочно-линейного изменения контрастности изображения в приборах наблюдения»

– Молодежная конкурс-конференции «Фотоника и оптические технологии». Новосибирск, 2016. Тема доклада: «Применение алгоритма сглаживания электронно увеличенного изображения в цифровых прицелах»

– XII международная конференция «Прикладная оптика 2016». Санкт-Петербург, 2016. Темы докладов: «Применение в цифровых системах прицеливания алгоритма сглаживания изображения, увеличенного электронным способом» и «Преимущества использования в составе цифрового прицельного комплекса фотоприемника с избыточным разрешением»

– XXIII всероссийская конференция студентов физиков и молодых ученых ВНКСФ-23. Екатеринбург, 2017. Тема доклада: «Реализация алгоритмов

сглаживания электронно увеличенного изображения в составе цифровых и тепловизионных приборов наблюдения»

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 33 работы, в том числе 10 статей в журналах, входящих в перечень ВАК, 1 статья в прочих журналах, 22 статьи в сборниках материалов конференций. Подана 1 заявка на патент РФ на изобретение, получено решение о выдаче патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 164 наименований, одного приложения. Объем основного текста диссертации 172 страницы, в том числе рисунков и схем – 66, таблиц – 10.

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СРЕДСТВ ПРИЦЕЛИВАНИЯ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

В разделе приводится аналитический обзор существующей прицельной техники, используемой на стрелковом оружии. Основное внимание уделено преимуществам и недостаткам тех или иных технических решений, примененных в существующих на данный момент изделиях. На основе аналитического обзора сформированы обоснованные требования к цифровому прицелу новой конструкции с улучшенной эргономикой и техническими характеристиками.

1.1 Особенности цифровых прицелов для стрелкового оружия и их отличия от прицелов остальных типов

В настоящее время существует несколько типов прицелов для стрелкового оружия: механические прицельные приспособления, оптические прицелы [1–3], прицелы ночного видения [4] и цифровые прицелы, принцип действия которых основан на преобразовании оптического изображения в электрические сигналы с последующей их цифровой обработкой и отображением на дисплее [5].

Наибольшее распространение в настоящее время получили классические оптические прицелы, предназначенные для наблюдения за местностью и обеспечения ведения прицельной стрельбы из стрелкового оружия в типовых условиях. Такие прицелы популярны за счет простоты конструкции, за счет простоты использования. Кроме того, преимуществом классических прицелов является бесконечное разрешение наблюдаемого в прицел изображения, а также передача изображения глазу наблюдателя «как есть» [3].

Для стрельбы в условиях естественной ночной освещенности используются ночные прицелы [15], чаще всего на базе электронно-оптического преобразователя (ЭОП), в зарубежной литературе называемого усилителем яркости. Действие приборов на основе ЭОП основано на явлении внешнего фотоэффекта. Внешний фотоэффект (фотоэлектронная эмиссия) состоит в испускании электронов из твердого тела в вакуум под действием квантов

оптического диапазона спектра. На этом эффекте основана работа ЭОП – вакуумного фотоэлектронного прибора, усиливающего в тысячи раз слабый свет видимого диапазона, а также преобразующего в видимое (с одновременным усилением) ИК и УФ излучение [4, 27]. В настоящее время применяются ЭОПы на основе микроканальных пластин [4].

Объектив создает на фотокатоде ЭОП изображение слабоосвещенного (ночным небом, звездами, луной) объекта, т.е. создает на поверхности фотокатода определенное распределение освещенности. Фотокатод представляет собой полупроводниковый слой, нанесенный на внутреннюю поверхность входного окна вакуумного корпуса ЭОП. На противоположной от объектива стороне фотокатода возникает фотоэлектронная эмиссия с аналогичным пространственным распределением плотности электронного тока. Несущий таким образом «электронное изображение» поток электронов ускоряется и фокусируется электронно-оптической системой на катодолюминесцентный экран. Ускорение фотоэлектронов происходит под действием напряжения порядка 10 кВ, вырабатываемого источником питания. Именно за счет преобразования фотонов в электроны и ускорения последних в ЭОП происходит усиление яркости [3, 4]. Ускоренные и сфокусированные фотоэлектроны, попадая на люминесцентный экран, вызывают его свечение в видимой глазом области спектра. Так как яркость свечения экрана в каждой точке пропорциональна числу попавших в нее фотоэлектронов, на экране создается видимое усиленное и преобразованное изображение наблюдаемого объекта. Это изображение наблюдается с помощью окуляра [3].

Усиление яркости в современных ЭОП достигает нескольких десятков тысяч раз, что позволяет современным приборам ночного видения на основе ЭОП наблюдать изображения в условиях ночной освещенности. Конструкция прицелов на основе ЭОП подробно описана в [10].

Перспективными в настоящее время являются цифровые прицелы – приборы на основе низкоуровневых твердотельных фотоприемников [5]. Конструктивно прицел представляет собой электронное устройство, состоящее из фотоприемника

с объективом, электронных плат цифровой обработки изображения, панели управления и микромонитора (рисунок 1).

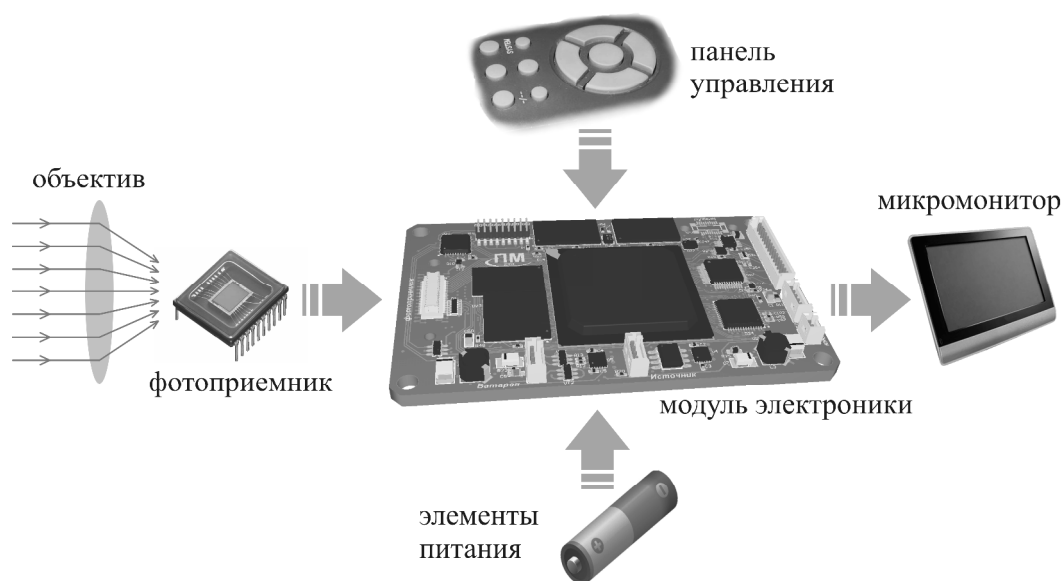


Рисунок 1 – Структурная схема цифрового прицела

Работа фотоприемника цифрового прицела основана на внутреннем фотоэффекте, состоящем в изменении электропроводимости полупроводников под действием квантов излучения оптического диапазона [28, 29]. Объектив создает на светочувствительной поверхности фотоприемника изображение наблюдаемого объекта. На каждом светочувствительном элементе (пикселе) фотоприемника возникает заряд, пропорциональный засветке этого элемента. После засветки заряд на каждом пикселе измеряется с помощью специальной схемы, и его значение умножается на необходимый коэффициент усиления. Таким образом, получается массив измеренных значений яркостей пикселей. Этот массив в дальнейшем подвергается анализу и преобразованиям с помощью специальных алгоритмов обработки изображений, и выводится на дисплей в виде, пригодном для восприятия человеческим глазом. В преобразованное изображение непосредственно перед выводом на дисплей программно встраивается изображение прицельной шкалы или прицельного знака.

Принципом работы цифровой прицел напоминает цифровую видеокамеру, с той лишь разницей, что прицел имеет крепление для установки на оружие, на дисплее прибора помимо наблюдаемых объектов отображается также прицельная

шкала, а сам прибор является устойчивым к ударным нагрузкам и обладает свойством «несбиваемости» – расположение и ориентация объектива и фотоприемника прибора относительно оружия после выстрела не изменяются [5]. Основной задачей, возлагаемой на прицел, является наведение оружия на цель с заданными показателями точности, в строгом соответствии с результатами вычислений баллистического калькулятора или с данными таблиц стрельбы. Поэтому техническая невозможность выполнения этого требования соответствует переходу оптико-электронного устройства из категории прицельных в категорию наблюдательных приборов [2].

Впервые приборы, подобные современным цифровым прицелам, были предложены в середине XX века, однако не получили распространения из-за невозможности их производства, обусловленной несовершенством существовавшей на тот момент элементной базы. Несовершенство заключалось в относительно больших массогабаритных характеристиках, относительно большом энергопотреблении, не позволяющих применять ее в носимых приборах.

К особому классу прицелов для стрелкового оружия относятся тепловизионные прицелы. По некоторым признакам они могут быть отнесены к категории цифровых прицелов, так как также имеют фотоприемник, микромонитор и электронный модуль цифровой обработки изображения, однако в зарубежной литературе термин «цифровые прицелы» применяется исключительно к приборам на основе фотоприемников диапазона до 1 мкм. В [31, 32] приводится описание некоторых существующих в настоящее время тепловизионных прицелов. Принцип действия тепловизионных приборов подробно описан в [3, 33, 34].

Преимуществом тепловизионных прицелов является способность обнаруживать в том числе замаскированные объекты по их естественному тепловому излучению, способность видеть в абсолютной темноте, а также при пониженной прозрачности атмосферы, в пыли, в дыму и при воздействии световых помех.

Недостатками подобных приборов являются слабая детализация изображения по сравнению с прицелами на основе ЭОП и цифровыми прицелами на основе фотоприемников видимого диапазона и специфический характер наблюдаемого изображения. Кроме того, в силу конструктивных и технологических особенностей в настоящее время тепловизионные прицелы имеют высокую стоимость, на порядок превышающую стоимость прицелов остальных категорий.

Существуют также комбинированные прицельные устройства, представляющие собой приборы с несколькими визирными каналами, каждый из которых относится к одной из вышеперечисленных категорий, например, прицельный комплекс 1ПН137 [35], входящий в экипировку Ратник.

Среди недостатков цифровых прицелов видимого диапазона по сравнению с классическими оптическими прицелами основными являются следующие:

- недостаточная цветопередача, ограниченная возможностями фотоприемника и микромонитора;
- недостаточная глубина резкости наблюдаемого изображения, связанная с тем, что при наблюдении в оптический прицел глаз наблюдателя самостоятельно перефокусируется на наблюдаемые объекты, а объектив цифрового прицела не обладает такой возможностью;
- ограниченное разрешение наблюдаемого в цифровой прицел изображения.

Кроме того, цифровым прицелам необходимо обеспечить питание от батареек или аккумуляторов, и при отсутствии питания, прицелы становятся неработоспособными.

По сравнению с ночными прицелами на основе ЭОП третьего поколения цифровые прицелы обладают меньшей чувствительностью, ограниченной возможностями применяемых в приборах фотоприемников. Небольшая чувствительность фотоприемников обусловлена их собственными шумами и темновым током [28]. Чувствительность низкоуровневых телевизионных систем, отображающих изображение в темпе не менее 25 кадров в секунду без применения подсветки в настоящее время составляет около $5 \cdot 10^{-4} \dots 10^{-3}$ лк, в то

время как приборы на основе ЭОП или гибридно-модульных преобразователей изображения, представляющих собой сопряженные с ЭОП фотоприемники, способны видеть при освещенности 10^{-6} лк [4]. Другим недостатком цифровых прицелов является то, что по сравнению с прицелами на основе ЭОП они обладают большим энергопотреблением – в то время как цифровые приборы в среднем потребляют до 3 Вт, энергопотребление прицелов на основе ЭОП обычно не превышает 250 мВт [15].

В то же время цифровые прицелы обладают рядом преимуществ. Оптические прицелы применимы в дневное время, когда освещенность окружающей обстановки превышает значение 5–10 лк. При меньшей освещенности среднестатистический человеческий глаз способен различать очертания объектов, находящихся только в непосредственной близости к наблюдателю. Связано это не с недостаточной чувствительностью человеческого глаза, а с тем, что находящиеся на расстоянии от наблюдателя объекты при такой освещенности оказываются недостаточно контрастными по сравнению с фоном и по этой причине сливаются с ним [36]. Приборы ночного видения на базе ЭОП применяются в ночное время при освещенностях менее 0,1 лк. Большая освещенность, а соответственно и большой световой поток приводит к тому, что наблюдаемое в прибор изображение оказывается настолько ярким, что наблюдатель не может выделить из фона отдельные объекты [37]. Аналогичная ситуация возникает при наличии в поле зрения прибора вспышек и встречных засветок, которые помимо того, что искажают наблюдаемое в прибор изображение, за счет большого усиления ЭОПом могут также приводить к кратковременному ослеплению наблюдателя. Кроме того, катод ЭОП после яркой засветки восстанавливается достаточно долгое время, в течение которого можно наблюдать «выжженное» остаточное изображение вспышки. Помимо дискомфорта наблюдателю, слишком мощный световой поток приводит к постепенной деградации ЭОПа прибора. Ресурс современных ЭОП может достигать 15000 часов, но при использовании прибора в вечернее и дневное время суток срок службы ЭОПа значительно сокращается – вплоть до нескольких часов

[38]. Теоретически ночные прицелы на базе ЭОП могут работать и в дневных условиях – с сильно задиафрагмированным объективом, но их дальность действия ограничивается сравнительно низкой разрешающей способностью ЭОП и ограниченностью ресурса работы [8], и на практике такое решение не применяется. Таким образом, неизбежно возникают ситуации, когда в оптический прицел «уже не видно», а в прицел ночного видения «еще не видно». Цифровые прицелы за счет возможности автоматической адаптации используемого визирного канала к условиям освещенности наблюдаемой сцены могут применяться и в дневных, и в ночных условиях в диапазоне освещенностей от $5 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^4$ лк [30] и, соответственно, остаются работоспособными в том числе в пограничных условиях. При этом цифровые приборы устойчивы к встречным засветкам и вспышкам и абсолютно безвредны для человеческого глаза, т.к. независимо от яркости источника излучения ярче, чем это безопасно для глаза, наблюдаемые объекты на микромониторе прибора отображены не будут.

Освещенность окружающей обстановки меньшая порога чувствительности современных цифровых систем видеонаблюдения, т.е. ниже $10^{-4} \dots 10^{-3}$ лк, что соответствует темной облачной или безлунной ночи, длится непродолжительное время [39]. При этом при стрельбе, если говорить о военном применении прицелов, неизбежно возникают вспышки, так или иначе способствующие освещению местности. Кроме того, наличие вспышек делает предпочтительными такие системы прицеливания и наблюдения, которые являются устойчивыми к световым помехам. Устойчивость к засветкам и возможность работы в дневное и сумеречное время дают право цифровым прицелам называться универсальными.

Возможность программного изменения изображения цифрового прицела позволяет помимо изображения наблюдаемой в прибор сцены выводить на дисплей различную информацию об условиях стрельбы и настройках прибора в виде пиктограмм или текста (рисунок 2). Например, на дисплее может быть отображена информация о наличии завала оружия [40], значения введенных в прицельный знак боковых и вертикальных поправок, информация о текущем режиме работы прибора, величина заряда аккумуляторной батареи. При

необходимости отображение пиктограмм и текстовой информации отключается. В цифровом прицеле может быть предусмотрено включение и выключение по выбору пользователя отображения дальномерных и угловых шкал различных типов, а также изменение типа прицельного знака и его цвета.

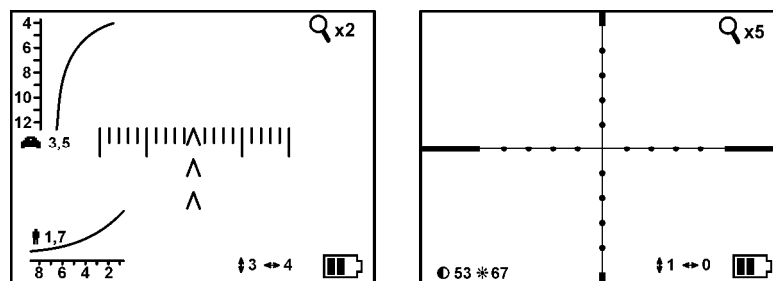


Рисунок 2 – Различные типы прицельных шкал цифрового прицела

Другое преимущество цифровых прицелов – отсутствие параллакса, видимого сдвига изображения цели по отношению к изображению прицельной марки. В классических прицелах в результате кажущегося смещения прицельной шпильки или перекрестья получается ошибка в наводке, и чтобы избежать влияния параллакса, рекомендуется при прицеливании ставить глаз всегда в одинаковом положении по отношению к окуляру, что достигается прикладистой ложей оружия и частым упражнением в прицеливании [41]. В цифровых и тепловизионных прицелах параллакс отсутствует за счет того, что изображение прицельного знака формируется программно и встраивается непосредственно в изображение наблюдаемой сцены: так как суммарное изображение отображается на одном и том же дисплее, при перемещении глаза относительно окуляра прибора прицельный знак относительно наблюдаемых объектов не перемещается.

Перспективным решением является дополнение цифрового прицела баллистическим вычислителем, автоматически рассчитывающим необходимые поправки стрельбы в зависимости от дальности до цели, угла места, метеоусловий, типа применяемого патрона и применяемого оружия. Необходимые для расчетов значения могут вводиться в прибор вручную или автоматически, если это предусмотрено конструкцией прибора, например, дальность может быть измерена автоматически при наличии встроенного в

прицел лазерного дальномера. Самостоятельный расчет необходимых поправок прицелом теоретически может привести к повышению скорострельности.

На сегодняшний день чувствительности цифровых прицелов недостаточно для обеспечения наблюдения без применения подсветки в условиях безлунной ночи, в то время как приборы на основе электронно-оптических преобразователей необходимой чувствительностью обладают. Это обстоятельство не позволяет называть современные цифровые прицелы круглосуточными. Тем не менее, исходя из изложенных преимуществ цифровых систем и предположив, что со временем появятся фотоприемники, обладающие большей чувствительностью, можно предположить, что цифровые прицелы являются более перспективными, чем прицелы на основе электронно-оптических преобразователей. Появление цифровых прицелов можно сравнить с появлением в свое время цифровых фото- и видеокамер, которые изначально уступали по техническим характеристикам существовавшим на тот момент пленочным приборам, но со временем, благодаря развитию элементной базы и технологий, практически вытеснили их с рынка.

Что касается классических оптических прицелов для стрелкового оружия, то предпосылок их замены цифровыми приборами нет. Основным недостатком пленочных фотоаппаратов по сравнению с цифровыми была необходимость частой смены фотопленки. Но оптическим прицелам замены расходных материалов для работы не требуется, в отличие от необходимости заряда аккумуляторов цифровых приборов. Вероятнее всего, цифровые прицелы займут особую нишу среди средств прицеливания и конкурировать с классическими прицелами не будут.

1.2 Обзор существующих цифровых прицелов для стрелкового оружия

Типичными представителями существующих в настоящий момент цифровых прицелов являются прицелы Pulsar Digisight N550, N750, N770, N960 [42, 43], Digisight Ultra N355 [44, 45], прицелы Armasight Drone Pro [46] и Yukon Photon RT [47]. Прицелы Pulsar имеют похожий внешний вид, представленный на рисунке 3,

и отличаются только техническими характеристиками. Внешний вид прицелов Armasight представлен на рисунке 4. Прицелы обеих марок предназначены для установки на охотничье огнестрельное оружие.

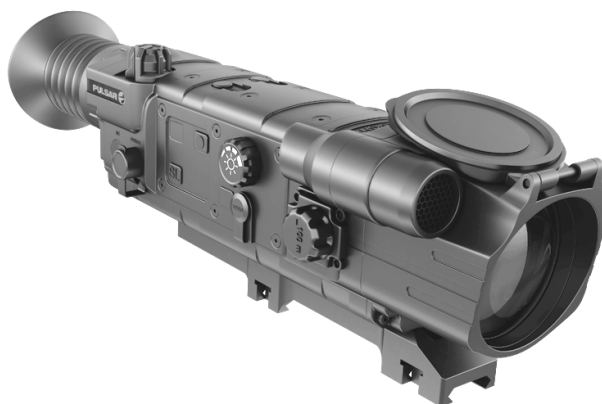


Рисунок 3 – Внешний вид цифрового прицела Pulsar Digisight N770A



Рисунок 4 – Внешний вид цифрового прицела Armasight Drone Pro 5x-10x

Прицел Digisight имеет относительно легкий композитный корпус. Органы управления располагаются преимущественно на правой стороне прицела и сверху. Обилие кнопок и переключателей вполне оправданно – в прицеле предусмотрено множество функций, часть которых специально выведена на отдельные кнопки для быстрой активации в полевых условиях [48].

Кнопки на верхней панели предназначены для управления цифровым увеличением и переключение цветовых режимов марки, кнопки справа – для выбора одного из нескольких алгоритмов обработки в зависимости от условий наблюдения (резкое увеличение контраста изображения, активация алгоритма повышения чувствительности матрицы в условиях низкой ночной освещенности). Также на панели находится колесо плавной регулировки яркости и контраста, а

непосредственно у объектива – колесо фокусировки. Прицел снабжен беспроводным пультом управления, который дублирует базовые функции – включение/выключение прибора, включение ИК-осветителя и включение цифрового увеличения.

В модели N750A применяется лазерный ИК-осветитель с длиной волны излучения 780 нм, модификация N770A оснащается осветителем с длиной волны 915 нм. Первый отличается большей дальностью подсветки, второй работает в невидимом для невооруженного глаза диапазоне. Также предусмотрена возможность использования дополнительного внешнего осветителя, крепящегося на планку «weaver», расположенную слева на корпусе прибора. На эту же планку могут быть закреплены дополнительные аксессуары, например, дополнительный блок питания или видеорекодер.

Важной особенностью прицела является большой набор сменных прицельных марок, «защитых» в памяти прибора. Марки различны по своему назначению – типовые охотничьи, для стрельбы из нарезного или гладкоствольного оружия на средних и малых дистанциях, баллистические, а также предназначенные для использования прицела с арбалетом или пневматической винтовкой [18].

Функционал цифрового прицела Armasight Drone Pro аналогичен функционалу прицела Pulsar Digisight. В приборе предусмотрена возможность смены прицельных шкал, возможность использования внешнего пульта управления, имеется выход NTSC/PAL для передачи изображения на внешний монитор или видеорекодер, на корпусе прибора имеется крепление для внешнего ИК-осветителя или источника питания [49].

В качестве дополнительной возможности конструкция Drone Pro предусматривает использование увеличивающей насадки перед объективом, повышающей дальность обнаружения целей (но одновременно уменьшающей поле зрения прибора и увеличивающей его массу). На рисунке 4 прицел изображен с установленной насадкой.

На рисунке 5 представлен внешний вид прицела Photon RT от Yukon, отличительными особенностями которого являются интеграция с IOS и Android устройствами, возможность видеотрансляции и записи в интернет и встроенный видеорекодер.



Рисунок 5 – Внешний вид цифрового прицела Yukon Photon RT 6x50S

Отличия описанных приборов заключаются в технических характеристиках (поле зрения, оптическое увеличение и пр.), а также в реализации пользовательского интерфейса и в конструктивном исполнении. В частности, у приборов по-разному выполнены узлы фокусировки объектива. Имеются отличия и в управлении прицелами: если часть органов управления Digisight выполнена в виде кнопок, а часть в виде вращающийся барабанчиков, то Drone Pro управляется исключительно кнопками.

По отзывам пользователей прицелов всех упомянутых марок [50] недостатками приборов являются недостаточная чувствительность в условиях низкой освещенности по сравнению с приборами ночного видения на базе оптико-электронных преобразователей, необходимость фокусировки объектива вручную при наблюдении объектов, находящихся на разных расстояниях, в то время как при применении классического оптического прицела фокусировка не требуется, а также монохромность наблюдаемого изображения.

Среди положительных характеристик приборов отмечаются характерные для всех цифровых прицелов преимущества [51], среди которых отсутствие параллакса, возможность выбора и использования нескольких прицельных шкал,

а также возможность применения приборов в сумеречное время (при условии использования подсветки).

Отмечаются также некоторые эргономические особенности. Несимметричное расположение органов управления Digisight ранних версий не позволяли полноценно управлять приборами. В то время как пальцы правой руки стрелка находятся на спусковом крючке оружия, свободная (при условии применения сошек левая рука) не имеет возможности изменить фокусировку или отрегулировать яркость изображения из-за того, что колеса регулировок расположены с правой стороны корпуса. У Drone Pro органы управления представлены кнопками, симметрично расположенными на верхней части корпуса. Фокусировка осуществляется вращением фокусирующего кольца, что позволяет осуществлять фокусировку как левой, так и правой рукой. Более поздние версии Digisight и появившиеся позже Photon имеют симметричное расположение органов управления.

Среди достоинств Digisight отмечается реализация пользовательского интерфейса: состояние прицела и режим работы отображаются в служебной полосе внизу дисплея в виде пиктограмм, буквенных и цифровых символов, что позволяет не загромождать изображение наблюдаемой сцены.

Прицелы постоянно совершенствуются. Например, нестабильность работы Digisight N550 (так называемая «заторможенность» изображения), в котором стоял экран типа LCD, в сильный мороз, была минусом этой модели применительно к использованию в зимних условиях. В отличие от «прародителя» модель N770 нормально работает при окружающей температуре в $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ за счет применения в конструкции морозоустойчивого цветного дисплея OLED-типа [52], а модели 900-х серий [43] имеют еще и большую чувствительность при работе в условиях пониженной освещенности. Но в то же время применение электронных комплектующих в коммерческом исполнении пока не позволяет использовать прибор при меньших температурах.

Помимо упомянутых приборов, доступных гражданским лицам в качестве охотничьих прицелов существуют также прицелы военного исполнения.

Например, прицелы Пума [53] белорусского производства, внешний вид которых изображен на рисунке 6.



Рисунок 6 – Внешний вид цифрового прицела 141.819-02 «Puma-TV»

Кроме того, существуют экспериментальные цифровые прицелы, серийно не выпускаемые. Типичный представитель таких приборов – это прицел Нагель [54], разработанный в Конструкторско-технологическом институте прикладной микроэлектроники (Филиал ИФП СО РАН), г. Новосибирск. Особенностью этого прибора является сопряжение электронного блока управления с лазерным дальномером и баллистическим калькулятором, что позволяет определять расстояние до выбранной цели и автоматически рассчитывать необходимые поправки, тем самым увеличивая скорострельность. С момента разработки указанного прибора часть производителей коммерческих цифровых прицелов также стала выпускать приборы со встроенной функцией изменения дальности. Примером может служить прицел Digisight Ultra N355 [44].



Рисунок 7 – Цифровой прицел Нагель, имеющий встроенный лазерный дальномер

Особый интерес представляют приборы с разнесенными линиями прицеливания и визирования, позволяющими вести огонь из неустойчивых

положений стрелка, в том числе сходу и от бедра или из-за укрытия. Примером является изделие «Носильщик» [55] производства КТИПМ, представляющее собой цифровой телевизионный прицел с дополнительными нашлемным или нарукавным модулями визирования [56]. Видеоинформация с прицела может передаваться по радиоканалу или кабелю. Внешний вид прицела представлен на рисунке 8. На рисунке 9 представлен внешний вид нашлемного модуля визирования для прицела.



Рисунок 8 – Цифровой прицел Носильщик



Рисунок 9 – Нашлемный модуль визирования

Патентный поиск приводит несколько патентов на устройства аналогичные упомянутому (и их конструкцию) [17–23] и на варианты реализации управления приборами [24–26], но на сегодняшний день ни один из упомянутых в [17–26] прицелов не существует ни в виде макета, ни в виде промышленного образца. В

части из патентов изложены идеи, не реализуемые на момент написания патентных заявок из-за не совершенства существовавшей в то время электронной элементной базы и невозможности реализовать на ее основе сложные алгоритмы обработки и анализа изображения.

В основе всех упомянутых приборов лежит оптико-электронный блок, осуществляющий получение изображения сцены с фотоприемника, его обработку, направленную на улучшение качества изображения, объединение изображения сцены с изображением прицельного знака и вывод получаемого изображения на дисплей. Отличия заключаются в конструктивном исполнении, в различном количестве и назначении органов управления прицелами. Также имеются различия в функциональных схемах приборов. Основные технические характеристики прицелов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Основные характеристики цифровых прицелов

Наименование характеристики	Digisight N770	Armasight Drone Pro 5x	141.819-02 Puma-TV	Нагель
Разрешение фотоприемника	500×582	752×582	752×582	752×582
Оптическое увеличение, крат	4,5	5,8	6	4
Поле зрения, °	5	4,5	4	5,5
Встроенный дальномер	–	–	–	+
Питание	4×AA, 6 В	2×CR123, 6 В	4×RCR123A, 12 В	1×NP-F570, 7.2 В
Длина волны излучателя подсветки, нм	915	–	810	–
Температурный диапазон, °С	–20...+50	–40...+50	–20...+50	–40...+50
Габариты, мм	340×95×94	280×69×80	295×95×100	290×90×110

По иному пути пошли разработчики прицела Tracking Point (США, Техас) [57], представленного на выставке CES 2013 в Лас-Вегасе, и прицела Remington 2020 [58], имеющих одинаковые оптико-электронные блоки и программное

обеспечение, и отличающиеся внешним только видом и некоторым функционалом. Внешний вид приборов представлен на рисунках 10 и 11. В основе обоих прицелов лежит компьютеризованный блок с операционной системой Linux, аналогичный используемым в современных смартфонах и GPS-навигаторах. К блоку подключена видеокамера, осуществляющая получение изображения наблюдаемой сцены и окуляр.



Рисунок 10 – Внешний вид комплекса «винтовка-прицел» Tracking Point



Рисунок 11 – Внешний вид цифрового прицела Remington 2020

Благодаря использованию компьютера, разработчикам удалось насытить приборы различным функционалом: анимированный прицельный знак, анализ изображения с автоматическим определением, попадает ли изображение цели в точку прицеливания, запись изображения в память, возможность передачи изображения на внешний компьютер или ноутбук, а также управление прибором через USB или Wi-Fi.

Идея создания прицела принадлежит Джону МакХейлу, вице-президенту Remington Defense. МакХейл задался целью создать «умный» прицел, который сглаживал бы ошибки стрелка, такие, как неверное прицеливание, «дергание» спускового крючка, неправильно выбранное время выстрела. Таким образом,

устройство позволяло бы точно вести стрельбу независимо от уровня подготовки стрелка [59].

Прототип прицела Tracking Point, сделанный по заказу МакХейла инженером Джоном Луфером в 2010 году, позволял осуществлять прицельную стрельбу в объекты размером с волейбольный мяч на расстоянии до 400 метров. Впоследствии был разработан комплекс «винтовка-прицел», получивший название Precision Guided Firearms, способный поражать цели на расстоянии до 700 метров [59]. Алгоритм стрельбы прост. Увидев в прицеле цель, которую нужно поразить, стрелок нажатием кнопки присваивает ей тег. То, что присвоение тега состоялось, будет видно по красной точке, которой будет помечен объект. Далее стрелку нужно совместить синее графическое перекрестие в прицеле с красной точкой. Для этого, нажав и удерживая спусковой крючок, нужно дождаться, когда перекрестие, совместившись с точкой-тегом, также станет красным. После этого происходит выстрел. Изображение сцены при этом можно наблюдать как в окуляр прибора, так и на экране внешнего компьютера или смартфона, на которые оно может быть передано по USB или Wi-Fi.



Рисунок 12 – Изображение, полученное комплексом Tracking Point, на экране планшетного компьютера

Решение о стрельбе принимается винтовкой на основе следующих факторов: данные лазерного дальномера, предварительно введенная пользователем информация о направлении и скорости ветра, угол наведения и координаты GPS, гироскопическая устойчивость, начальная скорость пули, эффект Магнуса, длина ствола и некоторых других параметров [57, 59].

Remington 2020 аналогичен прицелу Tracking Point, но отличается отсутствием привода, осуществляющего управление спусковым механизмом винтовки. Вместо автоматического выстрела в момент наведения винтовки на цель, происходит изменение цвета прицельного знака, указывающее на то, что в данный момент времени можно произвести выстрел [58].

На отдельные узлы упомянутых двух приборов также имеются патенты [60, 61]. Патентообладателем является TrackingPoint Inc. – компания-разработчик приборов. Кроме того, компанией запатентован механизм привода спускового крючка оружия, управляемый прицелом [62].

В [63] приводится описание стрелковых испытаний прицела Tracking Point на винтовках Surgeon Rifles в калибрах .300 и .338LM. По заверениям испытателей прицел выдержал ударные нагрузки на обоих калибрах, и при его помощи удалось успешно поразить цели на расстоянии 1 км (в [63] указано расстояние 1200 ярдов), однако данных о полученной комплексом кучности стрельбы и о размерах пораженных целей не приводится.

Впоследствии с учетом опыта Tracking Point другими производителями стали выпускаться компьютеризованные приборы. Благодаря использованию в конструкции одноплатных компьютеров во многих прицелах появилась возможность интеграции со смартфоном, записи видео на флеш-карту, трансляции видео, всевозможные интерактивные меню, изменяемые прицельные сетки, встроенный баллистический калькулятор и многие другие функции. В частности запись и трансляция видео по Wi-Fi доступна в приборах 2016–2017 годов выпуска Photon RT [47] от Yukon. Другим примером может служить семейство приборов ANT X-Sight [64], внешние виды которых представлены на рисунке 13. Отличительной особенностью двух версий этих приборов друг от друга является выполнение узла фокусировки объектива. Если у первых моделей объектив фокусировался подкручиванием вокруг своей оси, что могло приводить к смещению визирной оси, то у поздних моделей фокусировка осуществляется установленным на верхней части прибора барабанчиком, сдвигающим один из

элементов объектива, при неподвижных относительно фотоприемника остальных элементах.



Рисунок 13 – Внешние цифровых прицелов ATN X-Sight (слева) и ATN X-Sight II (справа)

1.3 Общие недостатки существующих цифровых прицелов

Улучшение технических характеристик и частичное устранение недостатков позволит повысить эффективность применения цифрового прицела.

Помимо уже упомянутых недостатков современных цифровых прицелов в [50] также отмечаются некоторые другие, касающиеся не только перечисленных цифровых прицелов в качестве примера, но и всех остальных, доступных в настоящее время:

- неудобство использования большого числа функций-регулировок и настроек прибора, а также необходимость настройки прибора для работы в конкретных условиях вручную;
- неудобство выверки прицела;
- необходимость перефокусировки объектива в момент при включении/выключении подсветки;
- малое разрешение фотоприемника по сравнению с разрешением дисплея;
- неудобство кнопок для управления оперативными функциями прибора в перчатках из-за отсутствия тактильности – эффекта обратной связи;
- усталость глаза стрелка при длительном использовании прицела.

Эти же недостатки отмечались пользователями приборов, в том числе профессиональными стрелками, в личных беседах.

Обеспечение тактильности органов управления прибора решается путем использования «щелкающих» барабанчиков, по аналогии с применяемыми на классических оптических прицелах, а также использованием кнопок с большим ходом.

Снизить утомляемость и усталость глаз стрелка может позволить применение в конструкции прибора не типового окуляра, применяемого в современных приборах, а ретинального дисплея – так называемого виртуального сферического экрана [65, 66]. Задача заключается в расчете соответствующего дисплея для прицела.

При испытании на полигоне некоторых образцов цифровых прицелов отечественного и зарубежного производства обнаружилось, что для каждого прибора при перефокусировке его объектива ухудшается кучность стрельбы. К ухудшению кучности также приводит использование приборов на крупнокалиберном оружии, что говорит о неустойчивости прицелов к ударным нагрузкам и смещению визирной оси прибора в момент выстрела.

1.4 Выводы по результатам первого раздела

1. Необходимо повышение чувствительности цифрового прицела по сравнению с современными аналогами. Решение этой задачи обеспечит работоспособность прибора без применения подсветки в условиях низкой освещенности при меньших значениях освещенности, чем способны работать существующие цифровые прицелы.

2. Необходима разработка автоматизированного электронного модуля, реализующего получение, обработку изображения наблюдаемой сцены и его передачу в реальном времени на дисплей прибора, адаптирующегося к условиям наблюдения и их изменениям без участия оператора.

3. Для упрощения работы прибор должен иметь интуитивно понятный пользовательский интерфейс, обеспечивающий вместе с органами управления обратную связь прицела со стрелком за счет тактильных ощущений и информации на дисплее. Упрощение заключается, во-первых, в том, чтобы исключить избыточные действия оператора при работе с прибором, и, как следствие, сократить время, затрачиваемое на поиск цели и производство выстрела, уменьшить время приведения комплекса «прицел-оружие» к нормальному бою, и при этом в тех же условиях повысить вероятность обнаружения цели. Во-вторых, упрощение заключается в уменьшении требуемого уровня подготовки стрелка, использующего прибор.

4. Необходимо решить проблему недостаточности поля зрения цифрового устройства и проблему дискретности изображения цифрового прицельного устройства и предложить способы прицеливания по малоразмерным объектам.

5. Необходимо провести анализ способов повышения точности и кучности стрельбы при использовании цифрового прицела, что позволит повысить эффективность применения подобных устройств.

2 РАЗРАБОТКА НОВЫХ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЦИФРОВОГО ПРИЦЕЛА И ИХ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном разделе рассматриваются вопросы построения основных узлов цифрового прицельного устройства в зависимости от возлагаемых на них задач, а также взаимодействие основных узлов между собой. На основе проведенного в первом разделе аналитического обзора сформулированы основные технические и эксплуатационные требования к новому цифровому прицельному комплексу. Разработаны и исследованы новые схемотехнические решения, предложены новые элементы конструкции некоторых узлов цифрового прицельного устройства, улучшающие технические характеристики изделия и упрощающие его использование.

2.1 Модуль электроники: выбор фотоприемника

Одной из задач на этапе разработки модуля электроники цифрового устройства наблюдения или прицела, является выбор фотоприемника. Критериев выбора несколько, из них основными являются чувствительность фотоприемника, его кадровая частота, энергопотребление, рабочий температурный диапазон, разрешение (общее число элементов), форма элементов, их шаг, а также формат получения изображения (прогрессивная или чересстрочная развертка).

Чувствительность – очевидный параметр, «чем больше, тем лучше», так как при прочих одинаковых параметрах прибор с более чувствительным фотоприемником способен видеть в условиях меньшей освещенности.

Кадровая частота должна быть не менее 25 кадров в секунду, чтобы наблюдение в прибор было комфортным для оператора. В то же время частота, существенно превышающая 25 кадров в секунду, является избыточной. Во-первых, изменения сцены на такой частоте глаз оператора не воспринимает. Во-вторых, при повышении кадровой частоты неизбежно возникает уменьшение связанного с ее величиной обратной зависимостью величины максимального

времени накопления (времени экспозиции), а это в свою очередь приводит к потере чувствительности прибора в условиях низкой освещенности. Для большинства фотоприемников допускается работа на пониженных частотах, и, соответственно, критерием выбора конкретного устройства является величина максимальной кадровой частоты выше 25 кадров в секунду.

Энергопотребление фотоприемника напрямую связано с частотой получения сигналов изображения, соответственно, выбирать следует фотоприемник с наименьшим энергопотреблением для кадровой частоты 25 кадров в секунду. Разумеется, энергопотребление не является решающей характеристикой, и при прочих равных следует сделать выбор в пользу фотоприемника с большей чувствительностью, чем в пользу фотоприемника с меньшим энергопотреблением.

Рабочий температурный диапазон выбирается исходя из задач применения разрабатываемого прибора. Например, для военного применения предпочтителен рабочий температурный диапазон не хуже $-40...+50$ °С (индустриальный температурный диапазон), в то время как для приборов гражданского применения допустимым может быть коммерческий температурный диапазон.

При разработке устройств видеонаблюдения обычно делают выбор из двух возможных технологий формирователей сигнала изображения: ПЗС (приборы с зарядовой связью) или КМОП (комплементарная система металл-оксид-полупроводник). И те и другие имеют свои преимущества и недостатки [67–69].

К преимуществам ПЗС-фотоприемников относятся низкий уровень шумов, высокий коэффициент заполнения пикселей (около 100%), и высокая эффективность (под эффективностью понимается отношение числа зарегистрированных фотонов к их общему числу, попавшему на светочувствительную область матрицы, для большинства ПЗС-фотоприемников эта величина достигает 95%) и большой динамический диапазон (чувствительность).

Недостатками ПЗС-фотоприемников являются сложный принцип считывания сигнала, а, следовательно, и им требуется сложная система управления, низкое

быстродействие (скорость считывания изображения ПЗС-фотоприемников разрешением от 768×576 элементов обычно не превышает 30 кадров/с), связанное с особенностью технологии построения [67–69], а также высокий уровень энергопотребления по сравнению с фотоприемниками, основанными на технологии КМОП.

Преимущества КМОП-фотоприемников следующие. Высокое быстродействие – до 500 кадров/с, низкое энергопотребление, почти в 100 раз меньшее по сравнению с ПЗС, а также перспективность технологии – на одном и том же кристалле возможно реализовать все необходимые дополнительные схемы: аналого-цифровые преобразователи, процессор, память, получив, таким образом, законченную цифровую фото- или видеокамеру на одном кристалле.

К недостаткам КМОП-фотоприемников относятся низкий коэффициент заполнения пикселей, за счет чего снижается чувствительность (эффективная поверхность пикселя не более 75%, остальное занимают вспомогательные элементы), невысокий динамический диапазон и высокий уровень шума, обусловленный так называемыми темповыми токами – даже в отсутствие освещения через фотодиод течет довольно значительный ток.

Основной аргумент против использования КМОП-матрицы в качестве фотоприемника для круглосуточного прибора наблюдения связан с малой чувствительностью КМОП-матриц, ее неоднородностью по массиву элементов, а также с неоднородностью темновых сигналов [68, 69]. В настоящее время чувствительность устройств видеонаблюдения на базе КМОП ограничена в первую очередь структурной помехой (англ. *pattern noise*). При компенсации структурной помехи флуктуационный шум КМОП превышает аналогичное значение шума ПЗС в 3–5 раз при одинаковой частоте считывания сигнала [67]. А так как выходной сигнал насыщения у матричных фотоприемников обоих типов соизмерим, то в настоящее время КМОП-фотоприемники имеют меньший динамический диапазон, чем ПЗС-фотоприемники.

Исходя из перечисленных преимуществ и недостатков фотоприемников обоих типов, было принято решение использовать в составе цифрового прицела в

качестве фотоприемника ПЗС-матрицу: для разрабатываемого устройства высокое быстродействие фотоприемника (от 200 кадров/с и более) не требуется – для комфортного наблюдения оператору достаточно скорости 25 кадров/с – кадровой частоты, применяемой в системах телевидения PAL и SECAM, но при этом для наблюдения в условиях низкой освещенности прицелу требуется высокая чувствительность фотоприемника.

Критериями для выбора конкретного фотоприемника являлись:

- прогрессивный формат получения изображения, так как при применении фотоприемников с чересстрочной разверткой на дисплее наблюдается эффект решетки при нахождении в поле зрения движущихся объектов [70];
- квадратный размер пикселей, необходимый для передачи на дисплей с квадратными пикселями изображения без линейных искажений [71];
- разрешение не менее 800×600 пикселей;
- кадровая частота не менее 25 кадров/сек;
- доступность на российском рынке электронных комплектующих.

При проектировании макетного образца цифрового прицела выбор фотоприемника был остановлен на ICX445ALA – ПЗС-фотоприемнике производства Sony. Фотоприемник выполнен по технологии EXview HAD и за счет этого обладает высокой чувствительностью [72]. Полное разрешение фотоприемника составляет 1280×960 пикселей, но его устройство также предусматривает возможность работы в режиме «центрального окна» с меньшим разрешением. Основные характеристики фотоприемника приведены в [72].

Относительно большой формат матрицы 1280×960 не может быть реализован на дисплее прибора, имеющем разрешение 800×600 (типовое разрешение современных дисплеев [73, 74]), при единичном электронном увеличении, однако дает возможность смещать изображение наблюдаемой сцены таким образом, чтобы точка прицеливания большую часть времени использования прицела находилась по центру дисплея [75], см. рисунок 14.

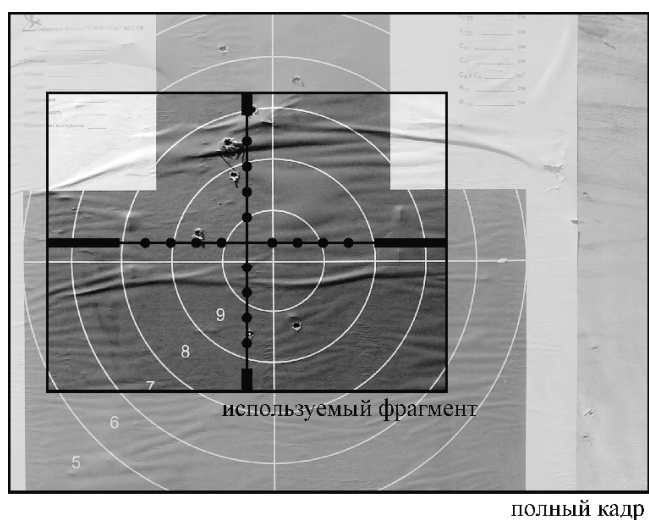


Рисунок 14 – Выбор фрагмента из изображения форматом 1280×960 для передачи на дисплей разрешением 800×600

Необходимость смещать изображение наблюдаемой сцены и положение прицельной шкалы друг относительно друга в процессе работы прицела обусловлена двумя причинами. Первая причина заключается в необходимости выверки прицела на конкретном оружии [76]. Вторая причина заключается в необходимости ввода поправок при стрельбе.

Осуществление выверки и ввода поправок возможно двумя способами. Первый способ – «классический», изображение сцены относительно дисплея прибора является неподвижным, и перемещение точки прицеливания осуществляется путем перемещения прицельной шкалы. Второй способ заключается в том, что прицельная шкала является неподвижной относительно дисплея, а изображение подвижно.

При возможности использования фотоприемника с большим разрешением, чем разрешение дисплея предпочтительным является второй способ выверки и ввода поправок [75]. При стрельбе на большие расстояния оружию могут потребоваться относительно большие углы прицеливания, особенно это касается оружия, предназначенного для стрельбы патронами с дозвуковой скоростью – винтовок ВСК-94 (индекс ГРАУ – 6В8), ВСС «Винторез» (индекс 6П29), АС «Вал» (индекс 6П30) и некоторых других. При больших углах прицеливания, прицельная марка в «классических» прицелах смещается вниз относительно наблюдаемого изображения, соответственно, при наведении марки на цель

верхняя часть поля зрения прибора оказывается занятой изображением неба, а интересующие стрелка объекты и потенциальные цели, находящиеся ниже точки прицеливания, оказываются за пределами поля зрения. Смещение же изображения вместо смещения прицельной шкалы позволяет потенциальным целям оставаться в пределах поля зрения, то есть такой способ ввода поправок позволяет повысить информативность кадров изображения по сравнению с «классическим» способом [77]. Схематично процесс прицеливания изображен на рисунке 15.

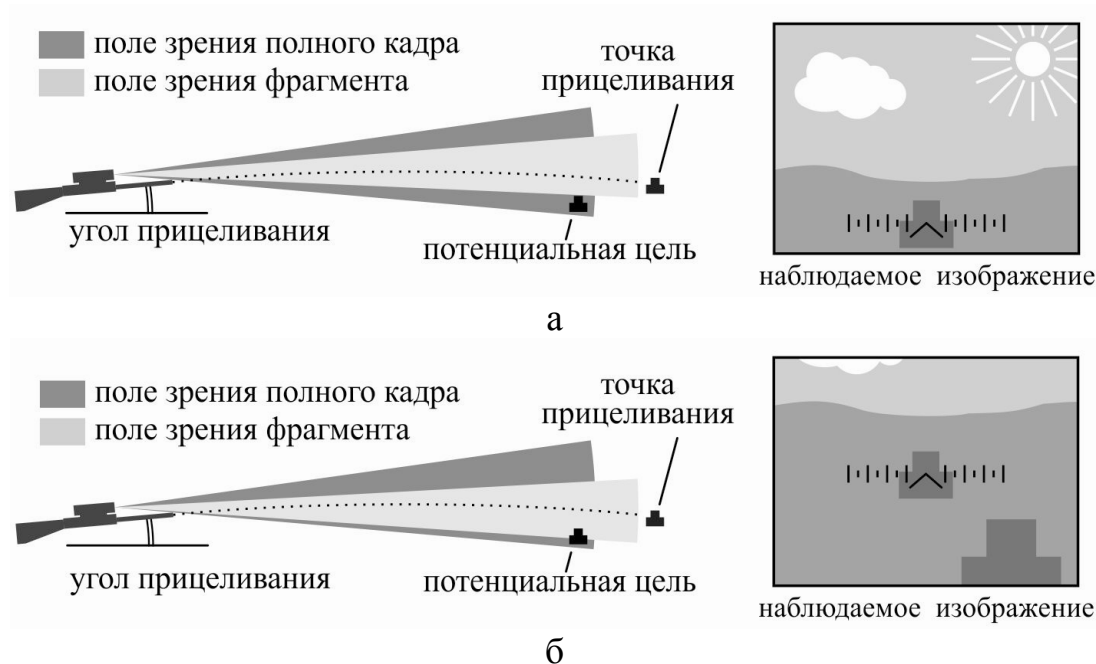


Рисунок 15 – Схематичное изображение процесса прицеливания:

- а) смещение прицельной шкалы – верхняя часть поля зрения не используется;
- б) смещение изображения – в нижней части поля зрения появляются ранее невидимые объекты, являющиеся потенциальными целями

Возникает вопрос, насколько большим должно быть разрешение фотоприемника по сравнению с разрешением дисплея? Смещения изображения должно хватать для обеспечения положения прицельного знака в центре поля зрения при выверке прицела и при вводе поправок, и большой запас по разрешению является избыточным.

Изначально предполагаемое поле зрения прицела по вертикали Ω составляет 6° , что соответствует угловому полю зрения прицела ПСО-1 [78]. Поле зрения фотоприемника должно быть большим на величину, равную максимальному углу

прицеливания $\Omega_{\text{приц}}$ и на величину смещения $\Omega_{\text{выверки}}$, допустимую при выверке прицела на конкретном оружии.

По грубой оценке угол прицеливания $\Omega_{\text{приц}}$ для винтовки ВСС составляет от $0,1^\circ$ до $1,9^\circ$ при стрельбе на расстояния от 100 до 400 метров соответственно. Значения получены расчетом, исходя из того, что начальная скорость пули для патронов СП-5 и СП-6 составляет 290 м/с, и из предположения, что пуля летит по параболической траектории под действием силы тяжести. Более точное значение угла с учетом всех условий может быть уточнено при помощи баллистического калькулятора или баллистических таблиц на винтовку, но для первого приближения и таких данных вполне достаточно. Поэтому если допустить возможность использования цифрового прицела винтовке ВСС, в качестве максимального угла прицеливания следует принять величину $1,9^\circ$.

Смещение прицельной шкалы $\Omega_{\text{выверки}}$ при выверке прицела на конкретной винтовке в угловых размерах примем равным $\pm 0,6^\circ$ или ± 10 тысячных дальности, что является наиболее распространенным диапазоном выверки линии прицеливания для оптических прицелов российского и зарубежного производства (диапазон выверки для прицела ПСО-1 составляет ± 8 тысячных [78]).

Таким образом, суммарный запас на смещение прицельной шкалы относительно изображения должен составлять

$$\Omega_{\text{смещ}} = \Omega_{\text{приц}} + \Omega_{\text{выверки}} = 1,9^\circ + 2 \cdot 0,6^\circ = 3,1^\circ \quad (1)$$

Общее угловое поле зрения фотоприемника по вертикали при этом должно быть равно

$$\Omega_{\text{общ}} = \Omega + \Omega_{\text{смещ}} = 6^\circ + 3,1^\circ = 9,1^\circ \quad (2)$$

Разрешение фотоприемника по вертикали должно быть в $\Omega_{\text{общ}}/\Omega$ раз большим, чем соответствующее разрешение дисплея. Численно это значение равно

$$Y = 600 \cdot 9,1^\circ / 6,0^\circ = 910 \text{ [пикселей]} \quad (3)$$

Аналогично рассчитывается необходимое горизонтальное разрешение фотоприемника исходя из величины горизонтального смещения линии прицеливания при выверке и угловой величины боковых поправок.

Горизонтальное поле зрения, и диапазон выверки у ПСО-1 аналогичные вертикальным. Диапазон боковых поправок составляет 20 тысячных или $1,15^\circ$ [78].

Но, дисплей цифрового прицела имеет не квадратную форму, следовательно, горизонтальное поле зрения изначально не равно вертикальному, и отличается во столько раз, во сколько отличается горизонтальное разрешение от вертикального. Для дисплея разрешением 880×600 элементов, величина исходного горизонтально поля зрения составляет

$$\Omega_{\text{гор}} = \Omega_{\text{верт.}} \cdot 800 / 600 = 6^\circ \cdot 800 / 600 = 8^\circ \quad (4)$$

Исходя из этого, общее угловое поле зрения фотоприемника по горизонтали должно составлять

$$\Omega_{\text{общ}} = \Omega_{\text{гор}} + \Omega_{\text{бок.попр.}} + \Omega_{\text{выверки}} = 8^\circ + 1,15^\circ + 2 \cdot 0,6^\circ = 10,35^\circ \quad (5)$$

Таким образом, численное разрешение фотоприемника по горизонтали должно быть равным

$$X = 800 \cdot 10,35^\circ / 8,0^\circ = 1035 \text{ [пикселей]} \quad (6)$$

Ближайшим типовым разрешением фотоприемников для вертикального размера 910 элементов и горизонтального размера 1035 элементов является разрешение 1280×960 . Таким образом, фотоприемники серии ICX445 производства Sony удовлетворяют необходимому требованию по разрешению с некоторым запасом. Величина 960 превышает величину 910, а величина 1280 превышает величину 1035, поэтому при использовании упомянутого фотоприемника на дисплее прибора прицельная шкала по вертикали и по горизонтали при любой допустимой поправке будет находиться в центре.

2.2 Модуль электроники: архитектура и схемотехника аппаратной части

Условно электронный модуль получения и обработки изображения цифрового прицела состоит из следующих частей: фотоприемное устройство, модуль обработки/преобразования изображения, модуль формирования служебного кадра и модуль вывода изображения. Фотоприемник преобразует

приходящий в объектив прибора световой поток в электрический сигнал или набор сигналов. Модуль обработки изображения преобразует полученное изображение таким образом, чтобы оно было пригодным для наблюдения оператором. Модуль формирования служебного кадра наносит поверх изображения наблюдаемой сцены изображение прицельной шкалы, служебную информацию об условиях стрельбы, о состоянии прибора и о текущих режимах его работы, а также реализует пользовательский интерфейс – изображения меню и диалоговых окон. Модуль вывода изображения осуществляет передачу изображения в виде электрических сигналов внешним устройствам, например, на дисплей, персональный компьютер или устройство записи изображения.

Получаемое с фотоприемного устройства изображение необходимо обработать. Обработка изображений в широком смысле слова означает выполнение различных операций над многомерными сигналами (сигналами, которые являются функциями многих переменных), к которым в том числе относятся телевизионные изображения и фотографии [79]. В телевидении традиционно обрабатывают изображение для того, «чтобы лучше было видно». Помимо создания условий для улучшения восприятия изображений и формирования определенного художественного образа (что используется в телевидении) целями преобразования изображения является выделение информативных признаков [80].

Так как для цифрового прицела предполагается эксплуатация и в дневное, и в ночное время, т.е. при освещенности менее 0.01 лк ночью и более 10000 лк днем [39], возникает необходимость предусмотреть в устройстве автоматическую нормировку яркости полученного изображения, для его комфортного восприятия наблюдателем.

Другая задача обработки изображения – помехоподавление. Необходимость подавления шумов, фоновых и импульсных помех вполне очевидна практически во всех сферах использования систем видеонаблюдения.

Таким образом, модуль электронной обработки изображения должен выполнять следующие функции:

- управление фотоприемником – необходимо обеспечивать формирование цифровых отсчетов кадров видеоизображения, и подачу управляющих сигналов на фотоприемную матрицу;
- получение «сырых» кадров изображения наблюдаемой сцены, т.е. оцифрованного сигнала, приходящего с фотоприемной матрицы;
- улучшение отношения сигнал/шум (путем накопления и усреднения сигнала);
- реализация функции автоматической регулировки яркости и контраста выходного изображения (адаптация коэффициента усиления сигнала к условиям наблюдения);
- подавление локальных и фоновых шумов и неоднородностей изображения, возникающих, например, из-за встречных засветок или вспышек;
- анализ и преобразование кадров изображения по заданным алгоритмам к виду, пригодному для наблюдения;

Модуль формирования служебного кадра осуществляет выполнение таких функций как:

- реализация пользовательского интерфейса для управления основными параметрами прибора;
- мониторинг состояния прибора при помощи имеющихся датчиков (измеритель заряда аккумулятора, датчик температуры, инклинометр, электронный компас и др.);
- формирование изображений меню и диалоговых окон, отображаемых в момент настройки прибора;
- формирование изображения прицельной шкалы и индикаторов о режимах работы прибора или условиях стрельбы в виде текста и пиктограмм

Оба модуля хоть и являются функционально разными, реализуются на базе одних и тех же микросхем в программном виде и аппаратно не разделяются. То

есть фактически они представляют собой один электронный модуль. Реализован он может быть традиционными способами на базе быстродействующих процессоров или используемых в качестве них программируемых логических интегральных схем [81–83], на базе одноплатного компьютера по аналогии с прицелами Tracking Point, а также на базе реконфигурируемой системы [84–85].

Применение в конструкции прибора компьютера существенно облегчает задачу разработчикам прибора, т.к. при проектировании не требует создания аппаратной части модуля электроники. Применение широко распространенных операционных систем, например, Linux позволяет также упростить разработку пользовательского интерфейса прибора. Однако такой подход имеет свои недостатки. Первый – это невозможность реализации на базе имеющегося на плате универсального процессора сложных алгоритмов обработки изображения из-за недостаточной производительности процессора. При этом по таким характеристикам как тактовая частота и количество выполняемых за секунду операций имеющийся в одноплатном компьютере процессор существенно превосходит традиционно используемые для обработки изображений процессоры. Причина недостатка производительности заключается в том, что процессор одноплатного компьютера изначально спроектирован как универсальное устройство, а не как специализированная микросхема для обработки видеоизображений, и на его базе труднее реализовать алгоритмы, требующие одновременного выполнения большого числа одинаковых элементарных операций [85], число которых зависит от разрешения обрабатываемого изображения. Другим недостатком является относительно большое энергопотребление одноплатного компьютера. Иным подходом, применяемым в частности в конструкции прицелов ATN [64], является реализация на базе одноплатного компьютера только модулей, обеспечивающих взаимодействие прибора с пользователем. В этом случае внешняя по отношению к одноплатному компьютеру видеокамера имеет в своей конструкции не только фотоприемник, но и свои отдельные модули обработки изображения.

Традиционным способом реализации модуля электроники в системах получения изображения, например в системах видеонаблюдения, является использование программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС, англоязычный термин – FPGA). ПЛИС используется в качестве генератора сигналов управления фотоприемной матрицей, в качестве устройства, осуществляющего предобработку получаемого изображения с помощью простейших алгоритмов (умножение на коэффициент, нормировка, вычитание постоянной, инверсия), и в качестве микросхемы, на базе которой реализован аппаратный кодек сжатия видеопотока. Простейшую обработку изображения также может выполнять быстродействующий процессор, но его применение имеет тот же недостаток, что и применение одноплатного компьютера – невозможность обеспечить требуемую вычислительную мощность при превышении некоторого порога скорости получаемого видеопотока и невозможность обеспечить требуемое энергопотребление [85]. Сложные алгоритмы и их комбинации (масштабирование полученного изображения с помощью интерполяции, гистограммные алгоритмы обработки изображения, анализ изображения на наличие в поле зрения объектов определенной формы) в подобных системах видеонаблюдения либо не применяются, либо реализуются на базе стационарного персонального компьютера, к которому видеокамера подключена [86]. Причина заключается в большей сложности написания и отладки программ, реализующих сложные алгоритмы, на языках описания аппаратуры (Verilog, VHDL и другие), применяемых в ПЛИС, по сравнению с программами на объектно-ориентированных языках программирования C++ и Java, применяемых при написании программ для персонального компьютера. Другим недостатком применения ПЛИС является сложность реализации на базе микросхемы пользовательского интерфейса.

Упомянутых недостатков лишены системы, построенные на базе реконфигурируемых систем. Реконфигурируемые вычислительные системы (устоявшийся англоязычный термин – Reconfigurable Computing) – это парадигма построения вычислительных систем, сочетающая в себе одновременно гибкость

программного подхода (неизменяемый процессор и изменяемое под задачу программное обеспечение) и высокую производительность аппаратного решения (неизменяемое специализированное устройство, выполняющее неизменяемый алгоритм) [84].

По сути, реконфигурируемая система позволяет строить гибкое решение в двух «ортогональных координатах» – и программно, и аппаратно одновременно. Например, прибор наблюдения может содержать в себе модули, выполняющие алгоритмы обработки изображения, адаптированные для низкой освещенности, и одновременно содержать модули, использующие алгоритмы обработки изображения, применимые для наблюдения в условиях повышенной яркости. Так как одновременное выполнение программ модулей обоих типов не требуется, они могут использовать одни и те же вычислительные ресурсы [87]. В [88] описан пример успешной реализации тепловизионного прибора на базе реконфигурируемой системы, способного автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям наблюдения без участия оператора.

Основу электронного модуля представляет собой работающие в связке ПЛИС, сигнальный процессор (DSP) и быстродействующие элементы памяти, в качестве которых используются синхронные динамические оперативные запоминающие устройства (SDRAM) большого объема. На базе ПЛИС реализованы аппаратные модули, осуществляющие высокоскоростную параллельную обработку потока сигналов изображения. Сигнальный процессор осуществляет интеллектуальный анализ изображения и управление прибором в целом. Один из элементов памяти используется для обеспечения работы аппаратно-программных модулей, реализованных на базе ПЛИС. Другой необходим для осуществления обмена данными между модулями ПЛИС и внешним по отношению к ним сигнальным процессором. Также имеются вспомогательные элементы – элементы контроля питания и аналоговые элементы, необходимые для управления фотоприемником и USB-контроллер, необходимый для передачи изображения внешним устройствам.

Такой подход построения системы анализа и обработки изображений совмещает высокую вычислительную мощность, эквивалентную от 64 до 512 одноядерным сигнальным процессорам класса Blackfin, малые габариты и низкое энергопотребление (не более 1 Вт), позволяющее использовать систему в носимых приборах [85]. Производительности модуля хватает на одновременную оценку и обработку в реальном времени кадров изображения форматом более чем 1600×1200 при скорости потока 25 кадров за секунду.

На рисунке 16 представлена архитектура электронного модуля. Под архитектурой модуля и его составных частей подразумевается аппаратно-программная модель, которая отображает их видимые свойства.

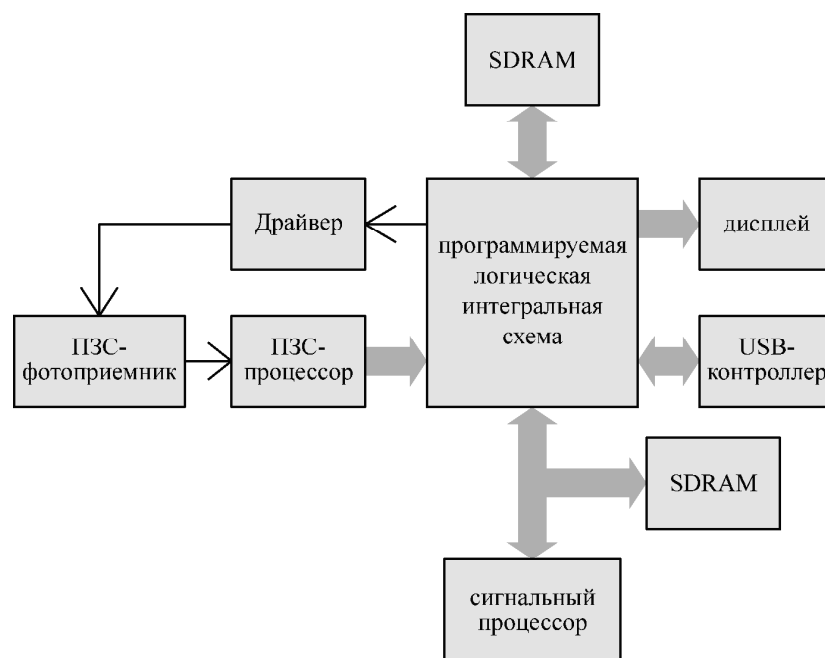


Рисунок 16 – Архитектура электронного модуля цифрового прибора наблюдения

Функционирование модуля электроники происходит следующим образом. При подаче питания происходит выход на рабочий режим импульсных преобразователей источника питания – установление питающих напряжений в соответствии с требуемыми уровнями, и запуск управляющего питанием прибора микроконтроллера (микроконтроллер и источники питания в качестве отдельных функциональных модулей в архитектуре модуля электроники не отображены). Затем происходит загрузка ПЛИС и процессора, инициализация внешних и

внутренних периферийных устройств. Данные действия занимают время порядка нескольких сотен миллисекунд.

После всей инициализации происходит запуск основной программы процессора, управляющей прибором и обеспечивающей его взаимодействие с пользователем, а также запуск программных модулей ПЛИС.

В рабочем состоянии модуль электроники подает на фотоприемник управляющие сигналы и принимает с его выхода аналоговый сигнал, соответствующий получаемому изображению. Аналоговый сигнал оцифровывается и в цифровом виде поступает в ПЛИС, где подвергается цифровой обработке. Затем преобразованное изображение передается на дисплей.

Получение аналогового сигнала с матрицы и его оцифровка выполняются ПЗС-процессором, являющимся специальным устройством, объединяющем в себе блоки аналоговой обработки сигнала ПЗС-матрицы: модуль двойной коррелированной выборки, аналого-цифровой преобразователь, операционные усилители и фильтры – все устройства, необходимые для получения и предобработки выходного сигнала ПЗС-фотоприемника. В качестве ПЗС-процессора в схеме было решено использовать микросхему VSP2582 производства Texas Instruments, характеристики которой описаны в [89]. Выбор аргументирован тем, что из доступных на момент разработки на российском рынке ПЗС-процессоров, способных работать в диапазоне температур $-40...+50$ °С, этот процессор обладает наименьшим энергопотреблением.

Так как используемый фотоприемник IXC445ALA имеет токовый выход [72] (англ. *open source output*), он не может быть подключен напрямую к ПЗС-процессору, и для согласования выхода фотоприемника с входом ПЗС-процессора следует применять преобразователь ток-напряжение. В качестве элемента согласования был выбран буферный усилитель, совмещенный с преобразователем ток-напряжение, ADA4800 производства Analog Devices. Технические характеристики буфера описаны в [90]. Там же приведено подробное описание его работы. Выбор на данной микросхеме был остановлен исходя из требований наименьшего энергопотребления и доступности на российском рынке.

Управление ПЗС-матрицами может осуществляться либо с помощью специальных генераторов сигналов вертикальной и горизонтальной развертки, рекомендуемых производителями матриц [91], либо с помощью ПЛИС. Для цифрового прицела предпочтителен второй вариант, так как в электронной схеме прибора ПЛИС присутствует, и логично использовать эту же ПЛИС для генерации сигналов, управляющих фотоприемником.

Напрямую ПЛИС подключать к ПЗС-матрице нельзя по причине разных значений напряжений на выводах. У ПЛИС выходное напряжение не превышает 3,3 В, а матрице в соответствии с документацией [72] на входы управления вертикальной разверткой необходимо подавать сигналы с уровнями +15 В, -8,5 В и 0 В. Таким образом, для подключения управляющей микросхемы к ПЗС-матрице необходим преобразователь уровней – драйвер вертикальной развертки, в качестве которого в схеме разрабатываемого прибора используется широко распространенная микросхема VSP1900 производства Texas Instruments [92].

На рисунке 17 изображен фрагмент принципиальной схемы цепей подключения ПЗС-фотоприемника к модулям, осуществляющим обработку получаемого изображения. На схеме с целью упрощения ее восприятия не показаны источники и преобразователи напряжений, демпфирующие конденсаторы, подключаемые к выводам питания ПЗС-матрицы и микросхем, а также элементы, не участвующие в управлении фотоприемником или получении его аналогового выходного сигнала. Также на схеме не отображены вспомогательные сигналы управления ПЗС-процессором.

Дальнейшую обработку полученных в цифровом виде данных осуществляют аппаратно-программные модули, реализованные на базе ПЛИС. Интеллектуальный анализ получаемых и обработанных данных осуществляют и ПЛИС, и сигнальный процессор, используемый в качестве быстродействующего микропроцессора. На сегодняшний момент существуют ПЛИС с уже встроенными микропроцессорами, но пока их энергопотребление при работе на высокой (порядка 200 МГц) частоте превышает энергопотребление отдельно подобранных ПЛИС и микроконтроллера, что было установлено опытным путем.

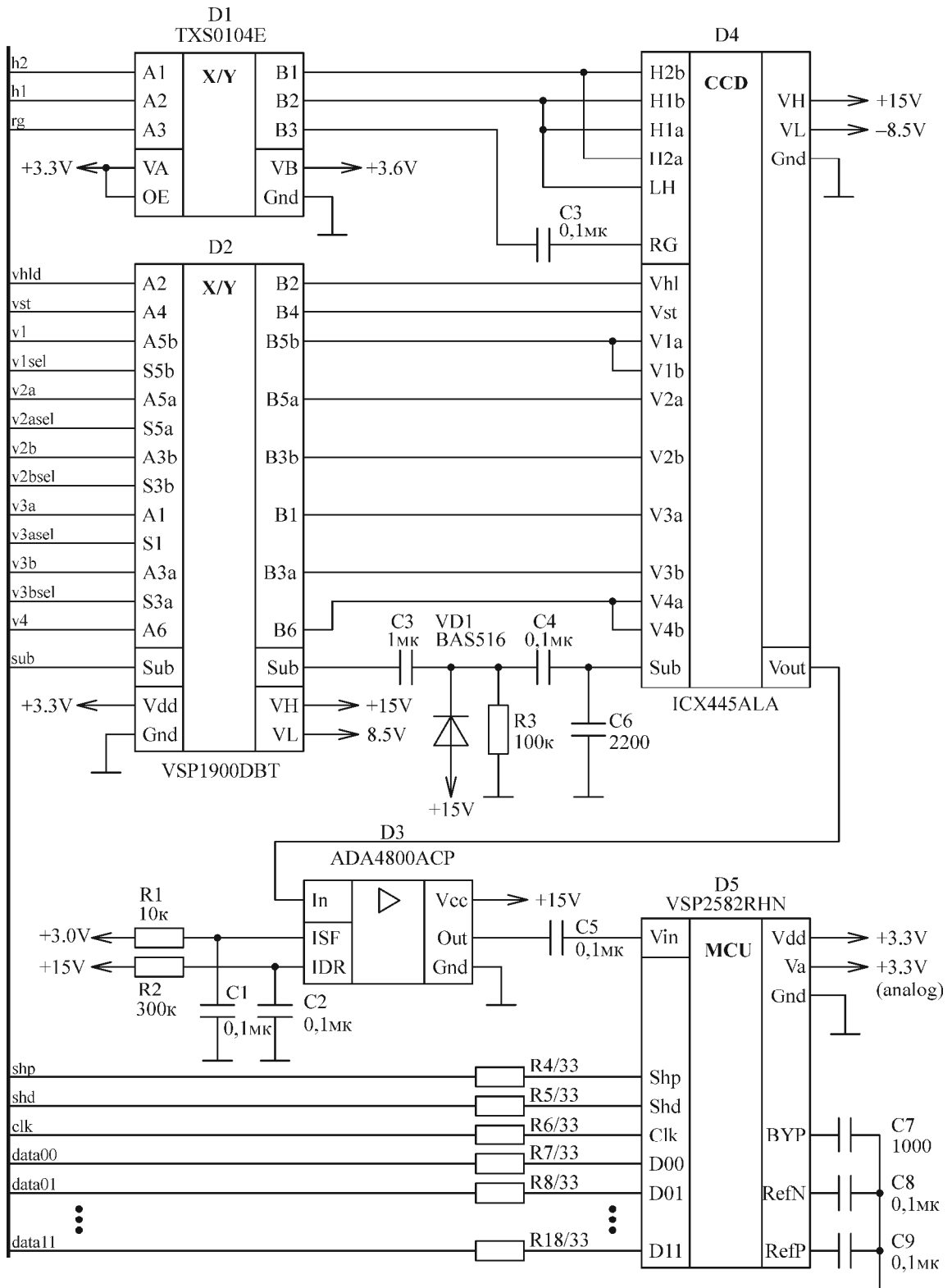


Рисунок 17 – Фрагмент принципиальной схемы электронного модуля цифрового прицела, отражающий подключение фотоприемника

В качестве ПЛИС в схеме используется микросхема EP3C40F780 производства Altera [93]. Производитель был выбран исходя из имеющегося опыта разработок электронных устройств на микросхемах Altera и опыта работы с

программным обеспечением, предлагаемым данным производителем для написания программ ПЛИС. Конкретная модель микросхемы выбиралась исходя из требований по числу выводов, которые могут быть использованы в качестве портов ввода/вывода.

По числу логических ячеек и объему памяти, требуемых для программной части проекта модуля электроники EP3C40F780 удовлетворяет требованиям с запасом исходя из опыта успешной реализации на микросхемах из этого же семейства модуля электроники для тепловизионных приборов [88], в котором применялись аналогичные алгоритмы обработки изображений. При этом предусмотрена последующая модернизация модуля электроники без замены его аппаратной части.

Используемый сигнальный процессор – ADSP-BF533 Blackfin производства Analog Devices. Процессор также выбирался исходя из имевшегося опыта проектирования электронных модулей обработки изображения. В частности, данный процессор хорошо себя зарекомендовал в схеме тепловизионного прибора наблюдения, описанного в [88]. Среди достоинств микросхемы – малое энергопотребление, высокая частота работы, высокая скорость выхода из режима сна, наличие аппаратного SDRAM-контроллера, аппаратных таймеров и многоканального высокоскоростного контроллера прямого доступа к памяти (англ. Direct Memory Access, DMA) [94]. Наличие контроллера DMA является ключевой особенностью используемой в модуле электроники прибора архитектуры – он позволяет полностью избавить ядро процессора от выполнения перемещения данных и, следовательно, полностью загрузить ядро полезной работой по обработке данных. Учитывая, что объемы получаемых данных достаточно велики (фрагменты кадров изображения), такой подход позволяет получить прирост производительности в несколько раз по сравнению с вариантом без использования DMA.

Основной задачей сигнального процессора является анализ изображения, получаемого с фотоприемника и вычисление корректирующих данных для

преобразователя сигналов, находящего в ПЛИС. Данные для анализа процессор получает из SDRAM, куда их помещает ПЛИС по команде от процессора.

SDRAM (синхронное динамическое оперативное запоминающее устройство) является высокоскоростным устройством памяти. Основная причина его использования – это высокая плотность памяти, десятки мегабайт на один корпус [95]. Такая плотность позволяет эффективно использовать его для оперативного хранения больших объемов информации – главным образом, кадров видеозображения. Модуль электроники прицела содержит две микросхемы SDRAM емкостями 16М 16-разрядных слов и 16М 32-разрядных слов, что позволяет одновременно хранить свыше 30 кадров форматом 800×600 пикселей (разрешение используемого дисплея [74]):

$$N = \frac{16M \cdot 16}{800 \cdot 600 \cdot 16} = \frac{16 \cdot 2^{20}}{480000} = 34,95 \quad (7)$$

В то же время микросхемы SDRAM обладают относительно небольшим энергопотреблением по сравнению с микросхемами памяти DDR, так как работают на более низких частотах.

Для обмена данными между сигнальным процессором и ПЛИС используется 16-разрядный SDRAM. 32-разрядный SDRAM используется для хранения обрабатываемых при помощи ПЛИС кадров изображения.

Благодаря относительно высокой скорости передачи данных (на частоте 100 МГц) время активной работы микросхемы получается относительно небольшим, и основное время SDRAM находится в режиме ожидания – так называемом режиме «холостого хода» [95], в котором его потребление очень низко (единицы мВт). Таким образом, среднее энергопотребление SDRAM в модуле электроники невелико, что является второй причиной использования данного вида памяти.

Вторичной задачей сигнального процессора является формирование служебных кадров, впоследствии совмещаемых с кадрами изображения (рисунок 18). Служебные кадры необходимы для реализации пользовательского интерфейса. Объединение кадров происходит ПЛИС, обмен кадрами осуществляется также через SDRAM.

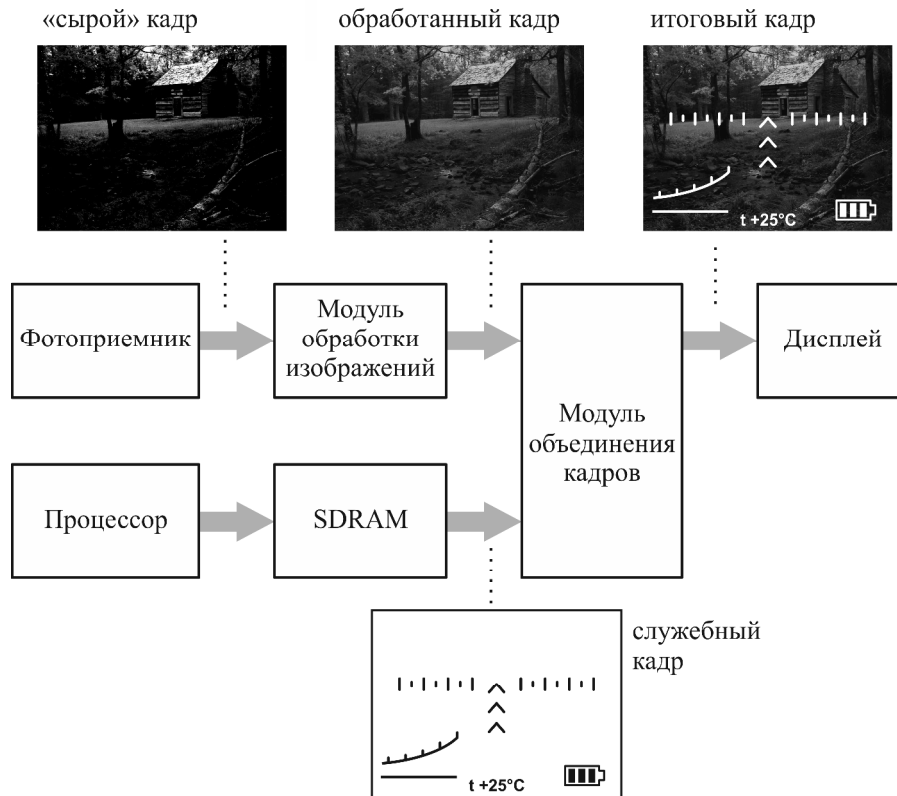


Рисунок 18 – Процесс формирования итогового изображения на дисплее прибора

USB-контроллер, в качестве которого в модуле электроники цифрового прицела используется микросхема CY7C68013 производства Cypress [96], необходим для обеспечения связи устройства с компьютером или ноутбуком. Технологический интерфейс с внешним компьютером позволяет выполнять ряд задач, например, передачу данных в компьютер для детального анализа и разработки алгоритмов, передачу кадров видеоизображения удаленного наблюдения или для последующей записи, осуществление настройки прибора с помощью компьютера или ноутбука [97, 98]. Выбор конкретной микросхемы обусловлен тем, что на момент разработки модуля электроники данная микросхема являлась единственным USB-контроллером, обеспечивающим передачу данных по шине HighSpeed USB 2.0 на скорости не менее 40 Мб/сек в обоих направлениях. Энергопотребление микросхемы при ее выборе не являлось решающей характеристикой, так как в активном режиме контроллер работает только в моменты подключения к компьютеру, и при этом потребление тока микросхемой осуществляется от компьютера.

Помимо упомянутых элементов в схему модуля электроники включен микроконтроллер, осуществляющий контроль состояния кнопки включения/выключения питания прибора. Этот же микроконтроллер осуществляет периодическое измерение напряжения аккумуляторной батареи при помощи встроенного аналого-цифрового преобразователя. При выборе микроконтроллера была принята решение использовать микросхему на основе широко распространенного в настоящее время ядра Cortex M3. Типичными представителями семейства подобных микроконтроллеров являются микроконтроллеры STM32 производства STMicroelectronics, преимущества которых описаны в [99]. Исходя из наличия/отсутствия у микроконтроллера необходимой периферии, числа доступных выводов и размера корпуса из общего каталога микроконтроллеров STM32 был выбран STM32F101T6.

С целью сохранения параметров прибора, например, выбранного режима работы, значений смещения прицельной марки после пристрелки, выбранного типа прицельной сетки, ее цвета и т.д. в состав модуля электроники включен элемент энергонезависимой памяти FRAM (Ferroelectric Random Access Memory) – сегнетоэлектрическая оперативная память с произвольным доступом. По сравнению с FLASH – другим типом энергонезависимой памяти, традиционно используемом для этих целей, данная память обладает преимуществом, заключающемся в большем допустимом числе циклов перезаписи (не менее 10^{14} раз [100]). Выбор конкретной микросхемы был остановлен на FM25VN10G производства Ramtron. Основные причины выбора – это простота подключения, упрощающая разработку программного модуля, обеспечивающего взаимодействие процессора с микросхемой, низкое энергопотребление (90 мкА в активном режиме, 5 мкА в режиме ожидания), большая скорость чтения и записи (на частоте до 40 МГц), а также возможность работы при низких температурах до -40 °С. Основные технические характеристики микросхемы и описание ее работы приведены в [100].

2.3 Организация управления питанием прибора

Помимо штатных аккумуляторов в условиях низких температур для питания прибора предполагается использование внешнего источника энергии, в качестве которого может быть использована внешняя аккумуляторная батарея, помещенная в тепло (например, под одеждой оператора) – так называемое «зимнее питание». Также может быть использован преобразователь напряжения бортовой сети транспорта, источник питания от сети 220 В, применяемый в помещении, и т.д. Исходя из этого, необходимо схемотехническое решение безопасного одновременного подключения нескольких источников питания с обеспечением минимального энергопотребления схемой объединения источников [101]. Подключение должно быть безопасным как для прибора, так и для источников, причем каждый из них может быть подключен «на горячую».

Трудность объединения нескольких источников питания заключается в том, что разные источники питания обладают разным напряжением и их параллельное включение может привести к выходу из строя обоих источников питания или одного из них.

Традиционно используемая схема объединения нескольких источников питания на основе диодов, соединенных катодами, обладает низким коэффициентом полезного действия. Падение напряжения на диодах в зависимости от их типа составляет от 0,2 В для диодов Шоттки до 0,8 В для «обычных» диодов. Это значит, что при общем энергопотреблении прибора около 2 Вт и напряжении питания 3,6 В рассеиваемая на диодах мощность составляет

$$P = U_d \cdot I = U_d \cdot P_{\text{общ}} / (U - U_d) = 0,2 \cdot 2 / (3,6 - 0,2) \approx 0,03 \text{ Вт}$$

то есть 15% от общей потребляемой мощности.

Существенно снизить энергопотребление позволяют так называемые контроллеры идеальных диодов (англ. Ideal Diode Controller), схемы включения которых предложены в [102]. В частности, контроллер LTC4352, работающий в паре с MOSFET-транзистором Si7336, позволяет снизить энергопотребление цепи

объединения источников питания с 3,5 Вт до 0,25 Вт при силе тока, проходящего через цепь, 10 А.

Так как корпус прибора имеет ограниченную площадь поверхности, возникает необходимость использования кнопки включения/выключения питания не только для управления питанием прибора, но также в качестве функциональной кнопки для изменения параметров прибора или режимов его работы.

В макете цифрового прицела это реализовано следующим образом: включение прибора осуществляется нажатием на кнопку питания. Если прибор находится во включенном состоянии, то при коротком нажатии кнопка питания играет роль функциональной кнопки, а при длительном (более двух секунд) удерживании кнопки, происходит выключение прибора.

Потребление прибором, находящимся в выключенном состоянии, тока недопустимо, т.к. к приборам наблюдения и прицелам предъявляются требования по длительному хранению в выключенном состоянии с установленными в батарейных отсеках элементами питания, не приводящему к ухудшению технических характеристик прибора, в том числе времени его работы [103, 104].

Используемые в бытовых приборах контроллеры кнопок питания, осуществляющее включение/выключение основной схемы питания прибора, для решения данной задачи не применимы, так как эти микросхемы даже находясь в режиме ожидания потребляют небольшой (порядка микроампера) ток. Кроме того, анализ существующих контроллеров кнопок показал отсутствие контроллеров, обеспечивающих включение прибора от двух независимых источников питания.

Исходя из этого, было принято решение реализовать схему управления питанием прибором на основе Р-канального MOSFET-транзистора, используемого в качестве управляемого ключа [105], с применением управляющего микроконтроллера. В цифровом прицеле использован как отдельный микроконтроллер, уже имеющийся в схеме микроконтроллер.

Фрагмент принципиальной схемы управления питанием прибора, представлен на рисунке 19. Понижающий преобразователь, обеспечивающий питание управляющего микроконтроллера, а также сам микроконтроллер на схеме с целью ее упрощения не показаны.

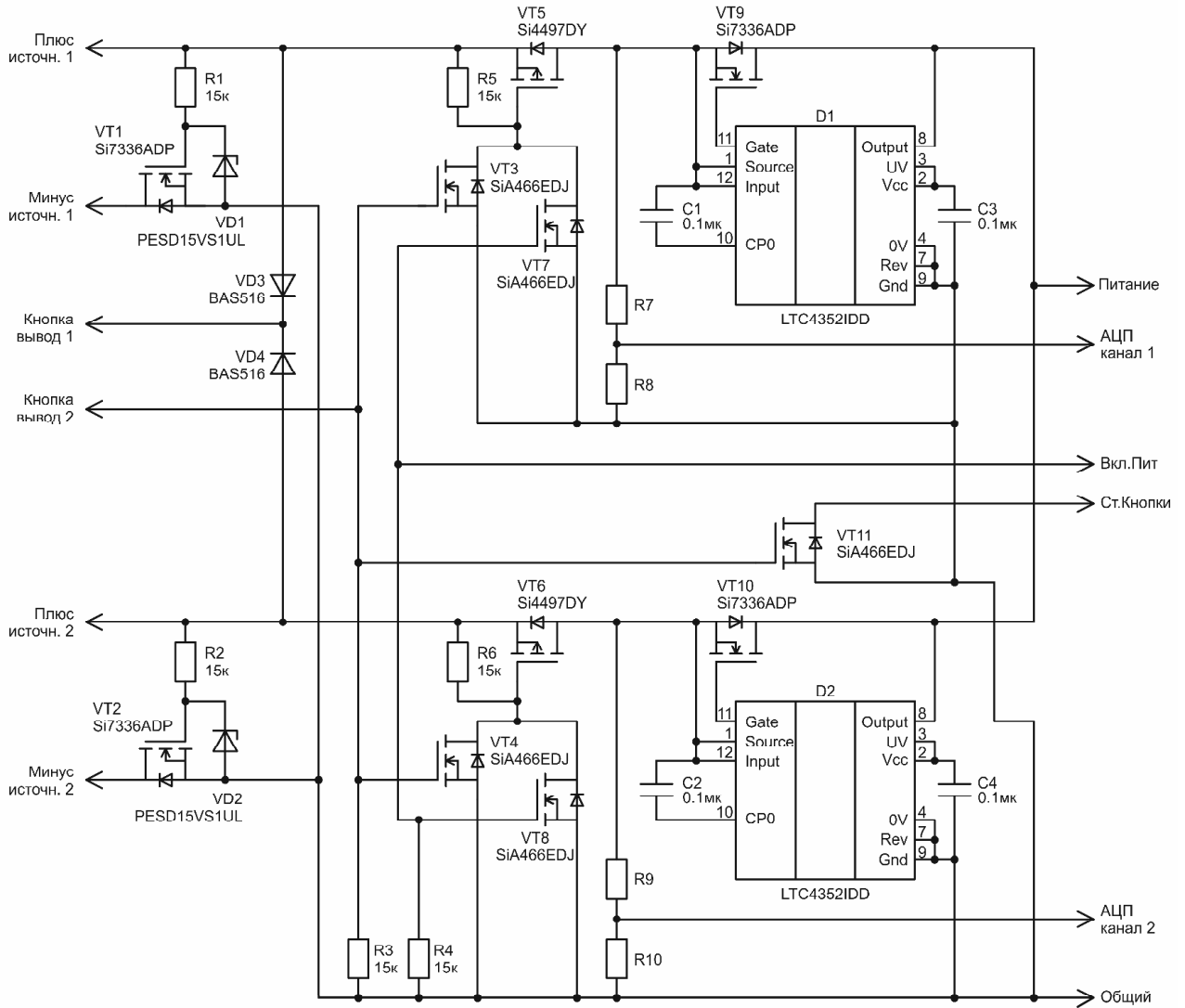


Рисунок 19 – фрагмент принципиальной схемы управления питанием цифрового прицела

В схеме в качестве ключей (VT5, VT6) использованы P-канальные транзисторы Si4497 производства Vishay Siliconix. Основными критериями отбора транзисторов являются величина сопротивления исток-сток, величина допустимого падения напряжения исток-сток и значение допустимой силы тока исток-сток. Напряжение исток-сток должно превышать напряжение подключаемого источника питания. Величина допустимой силы тока исток-сток должна в 3–5 раз превышать величину потребляемого прибором тока на случай

«броска» в момент включения, создаваемого емкостями по питанию основной схемы. Величина сопротивления исток-сток подбирается из соображений «чем меньше, тем лучше». Для Si4497 величина сопротивления исток-сток составляет 0,0046 Ом (при напряжении затвор-сток $-4,5$ В), максимально допустимое напряжение исток-сток составляет -30 В, а значение допустимой силы так исток-сток составляет 30 А, максимально допустимое значение силы тока для импульса составляет 70 А [106].

Основное требование, предъявляемое к транзисторам VT3, VT4, VT7, VT8, VT11, – допустимое напряжение исток-сток и допустимое напряжение затвор-сток должны превышать напряжения источников питания. Для примененных в схеме SiA466 оба значения напряжений составляют 20 В [107]. Второе требование – при подаче на затвор транзистора напряжения с выхода микроконтроллера, соответствующего логическому 1, транзистор должен открываться. Для SiA466 это значение составляет 2 В. Дополнительным преимуществом использования транзистора SiA466 является наличие встроенной защиты затвора от статического электричества, что позволяет исключить элементы защиты из общей схемы.

К диодам VD3, VD4 особые требования не предъявляются, за исключением величин допустимого прямого и обратного напряжений. Эти величины должны превышать величины напряжений источников питания. Требования по величине допустимого тока не предъявляются по причине пренебрежимо малых значений токов затвор-сток транзисторов VT3 и VT4.

Алгоритм реализации кнопки включения прибора следующий [101]. В выключенном состоянии ключи VT5, VT6 разомкнуты. При нажатии на кнопку питания через диоды VD2 или VD3 происходит подача напряжения на затворы управляющих транзисторов VT3, VT4, которые замыкают ключи. При этом происходит включение всей схемы, в т.ч. управляющего микроконтроллера.

Один из выводов микроконтроллера подключен к цепи «Ст.Кнопки», по логическому уровню на которой контроллер определяет статус кнопки питания: нажата или отпущена. Цепь является подтянутой к логическому уровню 1

внутренним резистором микроконтроллера или внешним резистором, соединяющим цепь «Ст.Кнопки» с цепью питания микроконтроллера.

Другой вывод микроконтроллера подключен к цепи «Вкл.Пит» по которой происходит подача напряжения на затворы управляющих транзисторов VT7, VT8. Если после включения питания прибора кнопку отпустить, то транзисторы VT3, VT4 становятся закрытыми, но за счет того, что микроконтроллер поддерживает VT7 и VT8 в открытом состоянии, ток через ключи продолжает проходить, тем самым обеспечивается «подхват» питания прибора.

В дальнейшем если нажать на кнопку, в цепи «Ст.Кнопки» изменяется уровень с логического 1 на логический 0. В момент изменения логического уровня в программе микроконтроллера выполняется соответствующая функция, сообщающая о реализации события «кнопка нажата», и одновременно таймер микроконтроллера начинает отчет времени удерживания кнопки. Если кнопка удерживалась дольше порогового времени, микроконтроллер переводит состояние цепи «Вкл.Пит» в логический 0, то есть напряжение на затворах VT7, VT8 снимается. Теперь если отпустить кнопку, ключи VT5 и VT6 окажутся разомкнутыми, что приведет к отключению прибора. Если же кнопка удерживалась менее порогового времени, то при ее отпуске прибор остается включенным. В программе микроконтроллера при этом должна выполняться функция, сообщающая о реализации события «кнопка отпущена», а также программно должен сброситься счетчик таймера, отсчитывавшего время удержания. Величина порогового времени по умолчанию составляет две секунды.

Применение диодов VD3 и VD4 для подачи напряжения на кнопку от двух источников питания первоначальному условию отказа от диодов в качестве объединителей напряжений не противоречит. Потребляемый ток схемы объединений напряжений кнопки складывается из относительно небольших токов затвор-сток транзисторов VT3 и VT4, при этом кнопка является нажатой относительно небольшой промежуток времени по сравнению с общим временем работы прибора, и поэтому в общее энергопотребление вносит пренебрежимо малый вклад.

Существует несколько вариантов защиты электронных схем от «переплюсовки». Наименее затратной по энергопотреблению является схема с использованием N-канального MOSFET транзистора в цепи подключения источника питания к «земле» схемы [108]. В качестве транзистора применен Si7336. На схеме, изображенной на рисунке 19, изображены два VT1 и VT2 – по одному для каждого из двух источников питания. Сопротивление исток-сток транзистора при напряжении 10 В составляет 3 мОм. Максимальное напряжение исток-сток составляет 30 В, напряжение затвор-исток 20 В, допустимый ток 25 А, допустимый импульсный ток 70 А [109]. Для защиты затвора транзисторов от статического электричества в схему дополнительно включены супрессоры на 15 В (на схеме VD1, VD2).

2.4 Конструкция модуля электроники

Механически модуль электроники представляет собой две платы. Необходимость разбиения модуля электроники на несколько плат продиктована тем, что фотоприемник должен располагаться в приборе параллельно объективу, т.е. вертикально. При этом возникает трудность вертикального расположения платы с большим числом элементов, поэтому было принято решение разместить ПЗС-матрицу на одной плате, а все прочие элементы на второй плате, расположенной в корпусе прибора горизонтально. Внешний вид основных плат и их взаимное расположение представлены на рисунке 20.

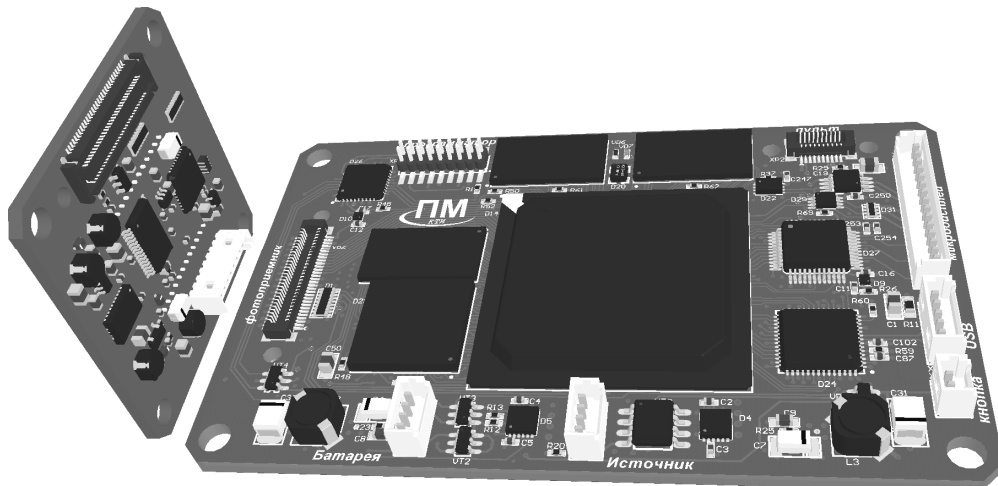


Рисунок 20 – Внешний вид основных печатных плат цифрового прицела

Помимо фотоприемника на вертикальной плате (плате фотоприемника) расположены управляющие фотоприемником драйвера вертикальной развертки, вспомогательные дискретные элементы, а также ПЗС-процессор. Близость расположения фотоприемника и ПЗС-процессора обусловлена необходимостью передачи аналогового сигнала без искажений. В непосредственной близости от ПЗС-процессора также расположены прецизионные понижающие преобразователи, используемые в качестве источников аналогового и цифрового питания ПЗС-процессора и буферного усилителя аналогового сигнала в соответствии с рекомендациями, указанными в [110].

Плата фотоприемника четырехслойная: два слоя являются сигнальными, а два выделены под «питание» и общий провод «землю» для уменьшения паразитной индуктивности в соответствии с рекомендациями, указанными в [111, 112]. Слой, выделенный под «землю» монолитен. Слой, выделенный под «питание» состоит из нескольких полигонов, каждый из которых подключен к одному из имеющихся источников напряжения. Сигнальные слои представляют собой набор дорожек, соединяющих между собой элементы. Трассировка платы представлена на рисунке 21. Помимо сигнальных дорожек на сигнальных слоях также отображены контуры располагающихся на плате элементов.

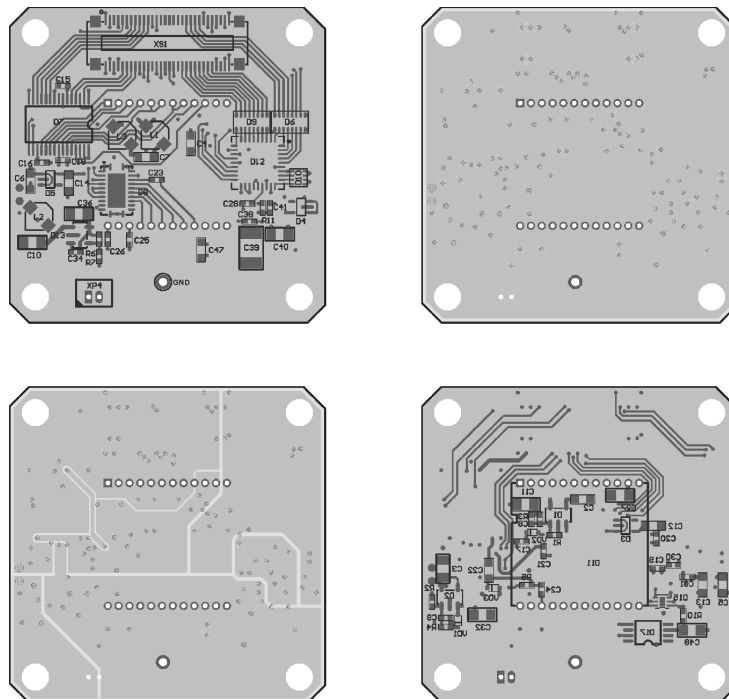


Рисунок 21 – Трассировка платы фотоприемника

Взаимное расположение элементов на плате подобрано таким образом, чтобы исключить возможность взаимного влияния обратных токов аналоговой и цифровой частей схемы и тем самым уменьшить искажения аналогового сигнала фотоприемника [110].

Размеры платы фотоприемника составляют 37×37 мм (на рисунке 21 представлено масштабированное изображение), что несколько превышает минимально необходимые значения для размещения всех элементов на поверхности платы. Как видно из рисунка 21, на плате остается свободная от элементов площадь, и с целью уменьшения габаритов часть элементов может быть «уплотнена». Необходимости в уменьшении размеров платы фотоприемника нет, так как определяющими минимальную ширину корпуса прицела являются размеры элементов питания и размеры механических элементов крепления объектива, а эти размеры превышают размеры разработанной платы (длина элемента питания типоразмера AA составляет не менее 50 мм без учета размеров контактных площадок, необходимых для его подключения к прибору).

«Цифровая часть» модуля электроники – ПЛИС, сигнальный процессор, элементы памяти, USB-контроллер и прочие элементы располагаются на горизонтальной плате (плате процессора). На этой же плате располагаются основные источники питания.

Плата процессора шестислойная. Два слоя также как и у платы фотоприемника выделены под «землю» и «питание», четыре слоя являются сигнальными. Два дополнительных сигнальных слоя используются по двум причинам. Одна причина заключается в особенности взаимного подключения ПЛИС, сигнального процессора и одного из SDRAM – все они подключаются к одной и той же шине данных, и на плате возникает большое число пересечений проводников. Другой причиной является специфика конструкции используемого корпуса ПЛИС – микросхема имеет большое число выводов, и все они расположены под ее корпусом, соответственно, при подключении выводов, расположенных ближе к центру корпуса микросхемы возникает необходимость использования дополнительных сигнальных слоев.

Трассировка сигнальных слоев платы процессора представлена на рисунке 22. Размеры платы составляют 80×50 мм.

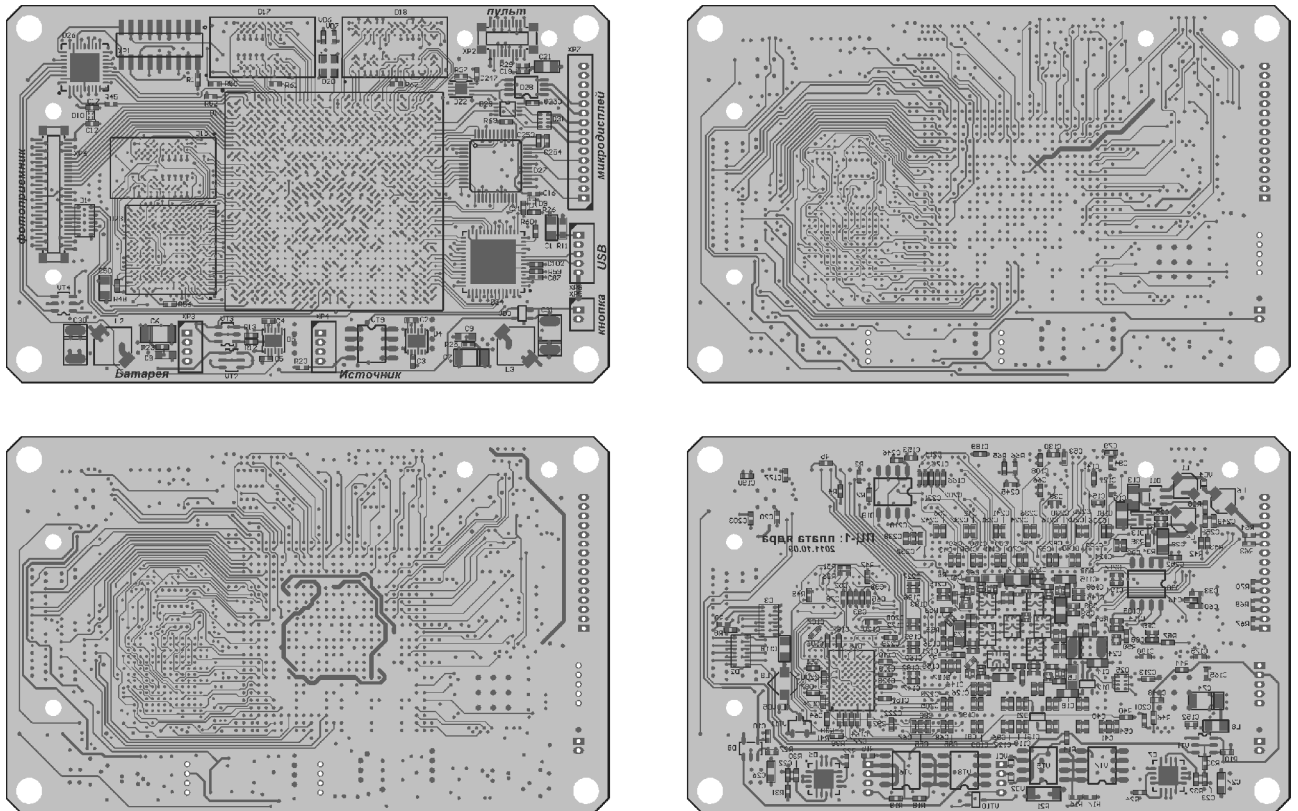


Рисунок 22 – Трассировка сигнальных слоев платы процессора

При работе цифрового узла на плате может происходить значительное изменение тока потребления за достаточно короткое время, соизмеримое с длительностью фронта сигнала. Скорость изменения тока в шине питания может оказаться значительной, что вызовет падение напряжения на индуктивности шины питания. Это может привести к заметным нарушениям работоспособности цифровых узлов [111, 113]. Для устранения помех подобного типа применяются различные методы конструкторского и схемотехнического характера, в частности применяются развязывающие конденсаторы. Выбор типа и количества конденсаторов подробно описан в [111]. По указанным рекомендациям в схему модуля электроники были добавлены конденсаторы емкостями 0,1 мкФ и 0,01 мкФ, располагающиеся на печатной плате в непосредственной близости от выводов питания ПЛИС, сигнального процессора, SDRAM и USB-контроллера, а также конденсаторы меньших емкостей, например, 0,022 мкФ и 0,001 мкФ,

располагающиеся на плате в непосредственной близости от выводов питания частотного умножителя ПЛИС.

Для упрощения монтажа основные элементы (микросхемы и разъемы) расположены с одной стороны платы, а однотипные вспомогательные элементы, такие как подтягивающие резисторы и демпфирующие конденсаторы – с другой ее стороны.

Для уменьшения помех при проектировании слоев платы также было устранено максимально возможное количество неоднородностей, связанных с взаимным расположением переходных отверстий [111, 112].

Соединяются платы между собой при помощи жгутов через разъемы. В качестве альтернативных вариантов рассматривалось соединение проводниками без разъемов и соединение плат межплатными разъемами без использования кабелей-проводников. Первый вариант неприемлем по двум причинам: безразъемное соединение усложняет процесс сборки прибора и уменьшает устойчивость конструкции к вибрационным нагрузкам – без дополнительного крепежа проводники могут отсоединиться от платы. Жесткое соединение двух перпендикулярно расположенных плат при помощи межплатных разъемов требует высокой точности изготовления элементов крепежа на корпусе прибора, чтобы при соединении плат не возникало перегибов и напряжений как самих плат, так и разъемов. В качестве альтернативы жгутам могут выступать шлейфы, представляющие собой гибкие или гибко-жесткие печатные платы.

2.5 Программная часть модуля электроники

В модуле электроники цифрового прицела используются несколько микросхем, поведение которых должно быть описано программно. Таковыми являются сигнальный процессор, программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), USB-контроллер и микроконтроллер, осуществляющий управление питанием прибора.

Программа USB-контроллера написана на языке Си. Программы для микроконтроллера и сигнального процессора написаны на языке C++ с применением элементов объектно-ориентированного программирования [114]. Программные модули ПЛИС описаны на языке описания аппаратуры на системном уровне SystemVerilog [115].

Остальные микросхемы либо не являются конфигурируемыми (например, модули памяти), либо конфигурируются сигнальным процессором или микроконтроллером (например, ПЗС-процессор и датчики).

Помимо управления питанием прибора, на микроконтроллер возложено несколько дополнительных задач:

- измерение напряжений источников питания;
- реализация функций кнопки питания, используемой не только в качестве кнопки «включить/выключить», то также и в качестве функциональной кнопки прибора;
- наблюдение состояния нажатия кнопок на панели прибора;
- получение данных с датчиков прибора и их интерпретация.

Датчиками являются акселерометр, необходимый для измерения угла наклона прибора (а вместе с ним и угла завала оружия [40]), и датчики направления магнитного поля, применяемые в энкодерах – органах управления прицелом, позволяющих осуществлять ввод поправок с помощью вращающихся барабанчиков, как в «классических» оптических прицелах [116].

Из необходимости одновременного выполнения нескольких задач одним микроконтроллером следует необходимость написания его программы с использованием механизмов, позволяющих разбить поток выполнения программы на несколько независимых, асинхронных по отношению друг к другу процессов и организовать взаимодействие между ними. Таковым является применение операционной системы (ОС). В качестве ОС была выбрана ранее успешно примененная в других проектах операционная система для однокристальных микроконтроллеров scmRTOS. Это операционная система реального времени с приоритетной вытесняющей многозадачностью [117], написанная на языке C++ и

предназначенная для использования на микроконтроллерах. ОС поддерживает до 32 процессов (включая системный), каждый из которых имеет уникальный приоритет. Процессы реализуют возможность создавать отдельный (асинхронный по отношению к остальным) поток управления. Также в ОС предусмотрено несколько способов межпроцессного взаимодействия – использование каналов, сообщений и семафоров [117].

Программа микроконтроллера состоит из трех пользовательских процессов, перечисленных в порядке приоритета:

1. Командный процесс, осуществляющий взаимодействие микроконтроллера с сигнальным процессором. В этом процессе осуществляется анализ получаемых микроконтроллером сообщений, контроль их целостности и выполнение соответствующих принятым командам функций. Таковыми могут быть передача данных о состоянии нажатия кнопок, передача значений датчиков и т.д.

2. Процесс, анализирующий состояние кнопки питания. В данном процессе происходит измерение величины времени удерживания кнопки включения/выключения питания, и, исходя из полученного значения, происходит либо запускаются процедура выключения питания прибора, либо сохраняется значение состояния кнопки, которые могут быть считаны сигнальным процессором.

3. Процесс, анализирующий состояние функциональных кнопок на панели прибора. В этом же процессе осуществляется опрос датчиков и пересчет данных, получаемых с датчиков, из условных единиц в конкретные значения. Также в этом процессе происходит периодическое измерение напряжений питания при помощи встроенного в микроконтроллер аналого-цифрового преобразователя. Полученные данные сохраняются в памяти микроконтроллера и передаются сигнальному процессору по запросу.

На рисунках 23–25 изображены блок-схемы алгоритмов работы пользовательских процессов программы. В каждом процессе после выполнения всех действий происходит повторение алгоритма. Повторения происходят бесконечно вплоть до выключения микропроцессора.



Рисунок 23 – Блок-схема алгоритма выполнения командного процесса

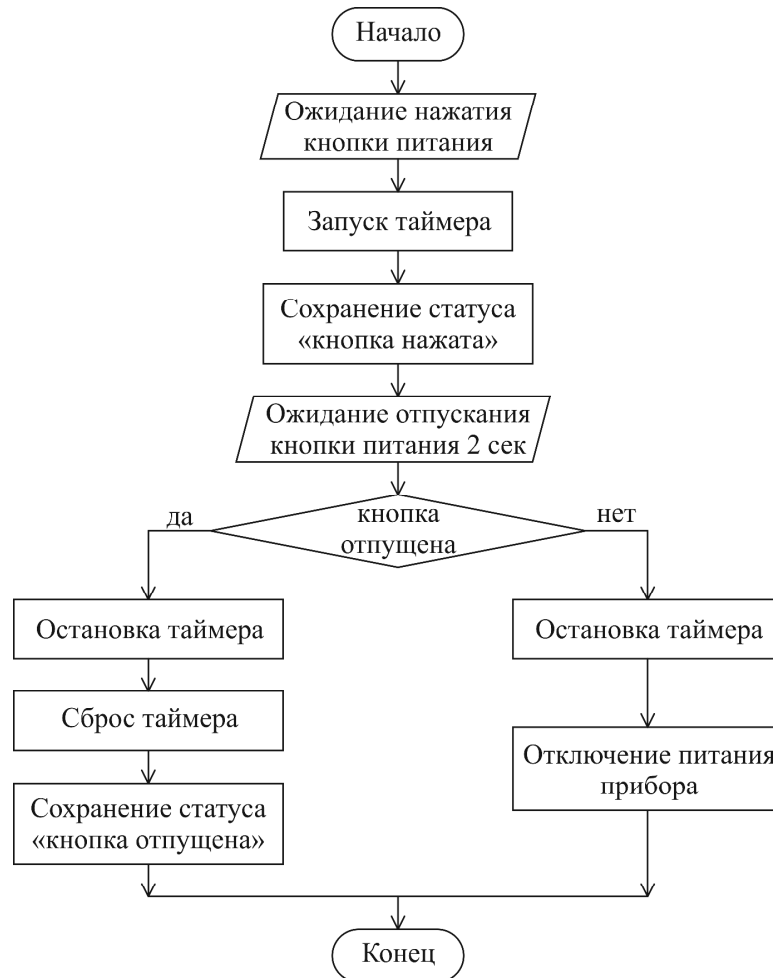


Рисунок 24 – Блок-схема алгоритма выполнения процесса анализа состояния кнопки питания

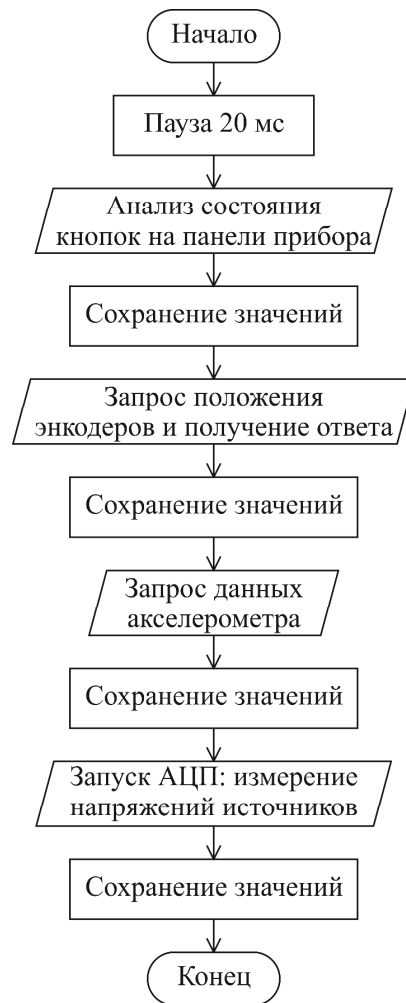


Рисунок 25 – Блок-схема алгоритма выполнения процесса анализа датчиков и функциональных кнопок

Каждый процесс с точки зрения написания программы выполняется параллельно остальным и является независимым. В действительности же на микроконтроллере все инструкции выполняются последовательно, но распределение ресурсов ядра микроконтроллера, взаимодействие между процессами, планирование, переключение контекста и другие подобные действия обеспечиваются операционной системой, поэтому для пользователя выполнение программы выглядит как одновременное выполнение функций трех пользовательских процессов.

Непосредственно перед запуском пользовательских процессов происходит запуск самой операционной системы и однократное выполнение кода, осуществляющего конфигурацию периферийных модулей микроконтроллера и предварительную настройку используемых датчиков.

В качестве USB-контроллера в электрической схеме прибора используется микросхема CY7C68013 производства Cypress. В состав микросхемы входят HighSpeed USB2.0 приемопередатчик и расширенный 8051 микропроцессор, управляющий микросхемой [96, 118].

В разработанном модуле электроники действия программы, выполняемой на встроенном в USB-контроллер микропроцессоре, сводятся к конфигурации USB приемопередатчика, блока прерываний и портов ввода-вывода микросхемы. Под конфигурацией приемопередатчика USB понимается настройка модулей, осуществляющих взаимодействие приемопередатчика с внешним по отношению к прибору персональным компьютером – присваивание идентификационных номеров VID и PID, настройка конечных точек [118], и настройка модулей, осуществляющих взаимодействие приемопередатчика с ПЛИС – установка полярностей сигналов синхронизации, разрядности шины данных и пр.

Программа выполняется однократно в момент подачи напряжения питания на микросхему, либо после перезагрузки микросхемы.

Также как и программа микроконтроллера, управляющего питанием, программа сигнального процессора условно может быть разделена на несколько отдельных модулей, каждый из которых выполняет свою отдельную задачу. Для распараллеливания кода программных модулей, запуск программы сигнального процессора также осуществляется при помощи операционной системы scmRTOS.

Отдельными процессами программы сигнального процессора являются:

1. Системный процесс, опрашивающий состояние отдельных модулей прибора. В этом процессе происходит сохранение в память служебной информации, извлечение информации из памяти, отправляются запросы микроконтроллеру, управляющему питанием прибора, производится управление другими процессами путем отправки им соответствующих сообщений.

2. Процесс, реализующий эхо-терминал [119], используемый для отладки прибора и управления им в лабораторных условиях и на этапе производства. Процесс осуществляет получение команд с персонального компьютера,

производит их анализ и запускает соответствующие полученным командам функции.

3. Процесс мониторинга изображения. В этом процессе осуществляется управление режимами работы модулей обработки изображения, физически расположенных в ПЛИС. Также в этом процессе осуществляется анализ гистограммы кадров изображения, и производятся различные расчеты, которые из-за особенностей ПЛИС не могут быть реализованы в ее модулях, то есть фактически в этом процессе происходит частичная реализация алгоритмов обработки изображений.

4. Процесс, реализующий пользовательский интерфейс. В этом процессе происходит анализ активности органов управления прибором – кнопок и энкодеров и производится формирование служебного кадра, накладываемого на дисплее прибора поверх кадра изображения наблюдаемой сцены. Служебный кадр состоит из диалоговых окон, меню, различных пиктограмм и текстовой информации, а также содержит в себе изображение прицельной шкалы прибора.

Взаимодействие сигнального процессора с органами управления прибора осуществляется не напрямую, а через микроконтроллер, непосредственно опрашивающий состояния кнопок. Сигнальный процессор получает информацию о состоянии кнопок и о положении энкодеров путем запросов, которые периодически посылаются микроконтроллеру.

Взаимодействие сигнального процессора с периферийными устройствами (как находящимися на плате процессора, так и находящимися на плате фотоприемника) осуществляется через ПЛИС, для чего используется специально реализованный внутри ПЛИС модуль. Для программы процессора взаимодействие выглядит как запись и чтение данных в регистры ПЛИС. Модуль взаимодействия с периферией сам определяет, какие сообщения и в каком виде отправить периферийным устройствам, получает от них ответы и результат сохраняет тоже в регистры ПЛИС, откуда процессор может произвести чтение.

Поддержка регистров процессором и их адресация ядром в качестве ячеек памяти в общем пространстве адресов (англоязычный термин *memory-mapped registers, MMR*), осуществляется на аппаратном уровне [120], и запись/чтение для них в программе аналогичны записи и чтению для переменных, несмотря на то, что физически регистры располагаются во внешней по отношению к процессору памяти. Для поддержки MMR со стороны ПЛИС был разработан MMR-контроллер – модуль, осуществляющий запись/чтение данных, сохраняемых в регистрах, из процессора по его командам.

Схема взаимодействия процессора с периферийными устройствами изображена на рисунке 26.

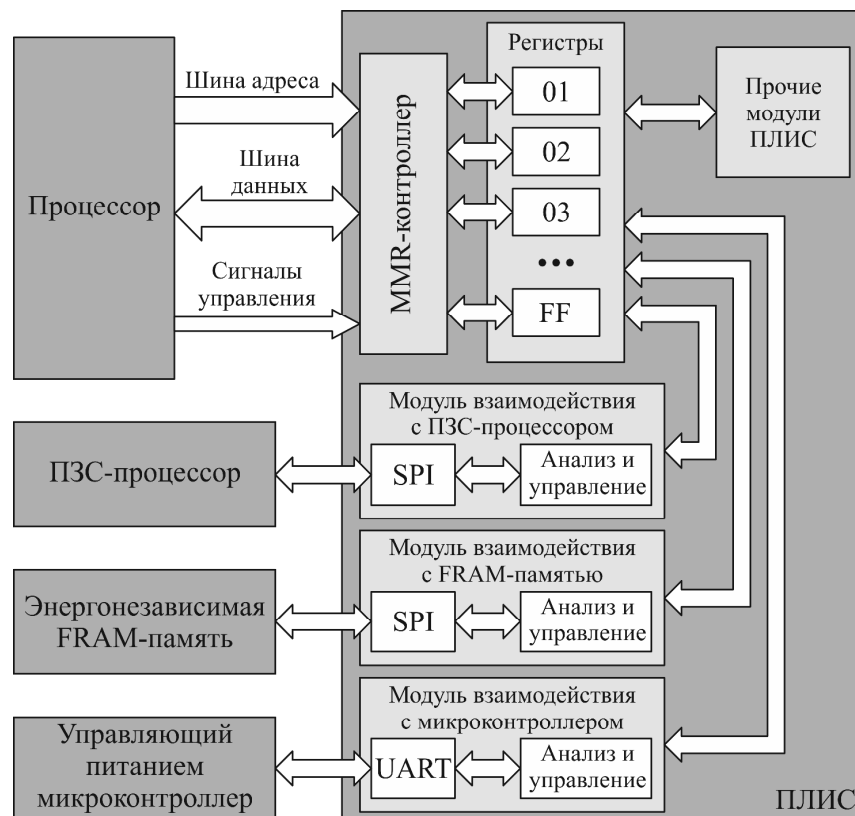


Рисунок 26 – Схема взаимодействия процессора с периферийными устройствами через ПЛИС с помощью модулей взаимодействия и регистров

Аналогичным образом осуществляется взаимодействие процессора с функциональными модулями в ПЛИС, выполняющими отдельные функции по получению или обработки изображения, а также с модулями в ПЛИС, осуществляющими взаимодействие тракта передачи изображения по USB на персональный компьютер и на дисплей прибора.

Преимущество такого подхода реализации обмена данными процессора с периферийными устройствами перед прямым соединением процессора с указанными микросхемами заключается в отсутствии необходимости переконфигурации аппаратного модуля передачи данных процессора перед каждой отправкой данных. Переконфигурация необходима из-за того, что разные периферийные устройства, подключаемые к одному и тому же SPI-модулю процессора, имеют разные разрядности данных, разные полярности сигналов SPI-модуля, передача данных осуществляется на разных скоростях. Другим преимуществом является отсутствие необходимости трассировки сигналов на печатной плате для микросхем, находящихся в разных, в том числе противоположных, ее частях в обход окружающих элементов, что частично упрощает конструкцию печатной платы.

Недостатком такого подхода может являться некоторая задержка при транспортировке данных сначала в модуль ПЛИС, а затем уже микросхеме-получателю. Но времена этих задержек являются несущественными, и, кроме того, значительно уступают по величине временам передачи данных, обусловленным скоростями работы приемо-передающих модулей периферийных устройств. Например, максимальная частота работы SPI-модуля ПЗС-процессора составляет 20 МГц [89], в то время как частота передачи данных из процессора в ПЛИС осуществляется на частоте не менее 100 МГц, причем данные из процессора в ПЛИС и наоборот передаются параллельно, а данные по SPI передаются последовательно.

ПЗС-процессор является одним из периферийных устройств, управляемых процессором описанным выше способом. В момент инициализации всех модулей прибора ПЗС-процессор настраивается для правильной работы с ПЗС-фотоприемником: устанавливаются необходимые значения аналогового и цифрового усилений внутренних усилителей микросхемы и величины внутренних задержек сигналов синхронизации и управления. Для остальных настраиваемых параметров используются значения по умолчанию предусмотренные производителем. Настройка ПЗС-процессора осуществляется через SPI-интерфейс

в соответствии с протоколом, указанным в документации [89]. Реализацию SPI-интерфейса осуществляет модуль в ПЛИС, отвечающий за взаимодействие с ПЗС-процессором. Сигнальный процессор записывает необходимые данные в соответствующие регистры ПЛИС, при получении данных модуль взаимодействия автоматически пересылает их ПЗС-процессору в соответствии заданным протоколом.

В процессе работы может потребоваться дополнительная настройка ПЗС-процессора, например, может быть изменен коэффициент аналогового усиления, в этом случае сигнальный процессор также записывает необходимые значения в соответствующие регистры ПЛИС, за которыми следует процедура передачи необходимых параметров ПЗС-процессору.

Таким же способом через модуль взаимодействия, физически расположенный в ПЛИС, осуществляется запись и чтение данных в энергонезависимую FRAM-память [100], в которой сохраняются пользовательские настройки прибора и служебная информация.

Аналогично осуществляется взаимодействие процессора с управляющим питанием прибора микроконтроллером, который периодически опрашивается для получения данных о состоянии нажатия кнопок на панели прибора, данных о напряжении источников питания и данных, полученных с энкодеров и акселерометра.

Для обмена большими объемами информации между процессором и модулями ПЛИС, которые не могут быть переданы через регистры, в частности кадрами видеоизображения используется SDRAM-память – высокоскоростное устройство памяти с высокой плотностью [95]. Это же устройство используется для оперативного хранения кадров изображения.

Обмен кадрами изображения ПЛИС с процессором необходим для реализации алгоритмов обработки изображений. В частности, процессор, выдав команду на загрузку в SDRAM требуемого количества кадров (от одного до нескольких десятков) и получив доступ к этой информации, производит анализ фрагментов изображения и вычисляет корректирующие коэффициенты для

каждого пикселя кадра. Затем эти коэффициенты передаются в ПЛИС (через регистры), где используются для коррекции изображения непосредственно в потоке в реальном времени.

По полученным кадрам изображения процессор может проанализировать необходимость изменения используемого алгоритма обработки изображений, на иной, с целью улучшения изображения в конкретных условиях.

Анализ кадров изображения осуществляется параллельно с обработкой данных в ПЛИС и независимо от нее. Поэтому при обработке изображений в реальном времени, независимо от сложности алгоритма анализа изображения, никаких замедлений в тракте передачи изображения от фотоприемника к дисплею или к внешним потребителям не происходит (рисунок 27).

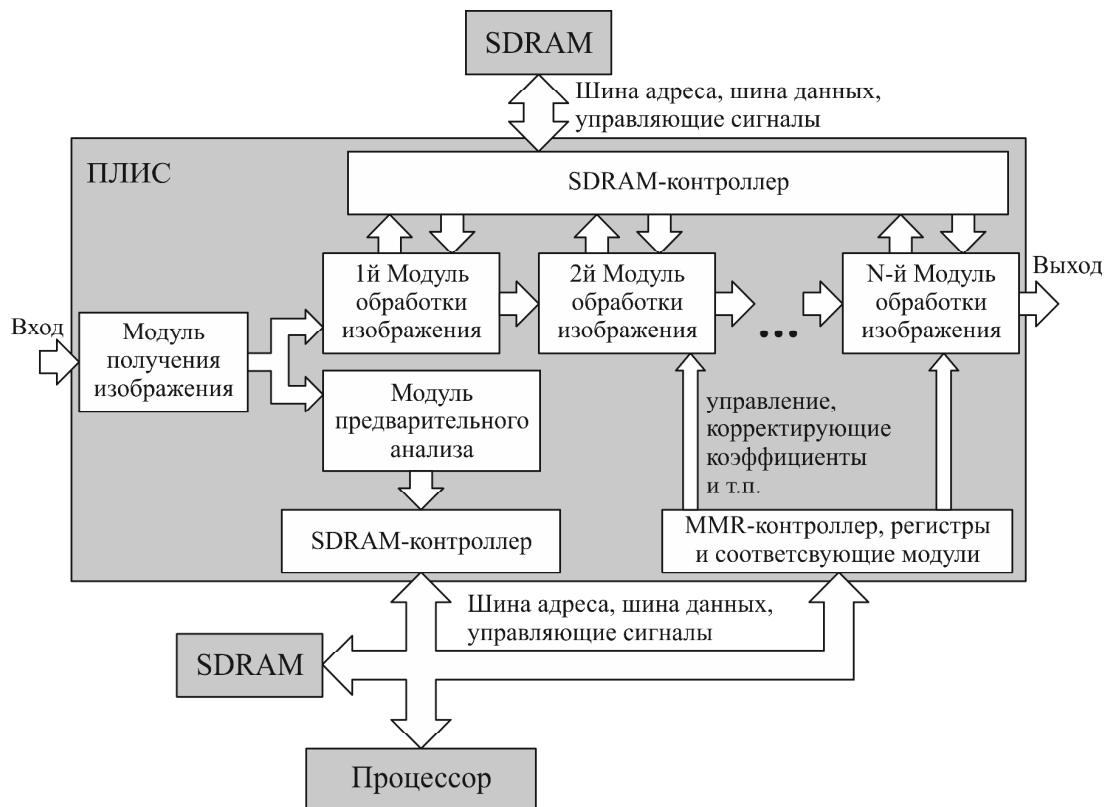


Рисунок 27 – Независимое расположение модулей тракта обработки изображений и модулей, осуществляющих анализ изображений

Буферизация обрабатываемых кадров изображения модулями ПЛИС также происходит в SDRAM-памяти, но уже не в той, которая используется для обмена данными между ПЛИС и процессором, а в отдельной. Использование памяти, служащей для обмена данными ПЛИС с процессором, привело бы к

значительному уменьшению пропускной способности тракта получения и обработки изображений, работающему асинхронно по отношению к процессору, из-за использования одних и тех же шины адресов и шины данных.

Обмен кадрами ПЛИС и процессора не является однонаправленным. Помимо получения кадров изображения сцены и их фрагментов процессором для анализа SDRAM также используется для передачи служебных кадров, создаваемых процессором, в ПЛИС. Служебный кадр в ПЛИС объединяется с кадрами изображения сцены, получаемыми после выполнения всех необходимых преобразований, непосредственно перед передачей итогового изображения на дисплей (рисунок 28).

Модули, осуществляющие анализ, обработку изображений и объединение изображения сцены с изображением служебного кадра функционируют одновременно, но независимо друг от друга. Все функции по обеспечению безопасного одновременного доступа к SDRAM-памяти и регистрам возложены на SDRAM-контроллер и MMR-контроллер, специально разработанные для решения этой задачи. Модули написаны на языке SystemVerilog [115].

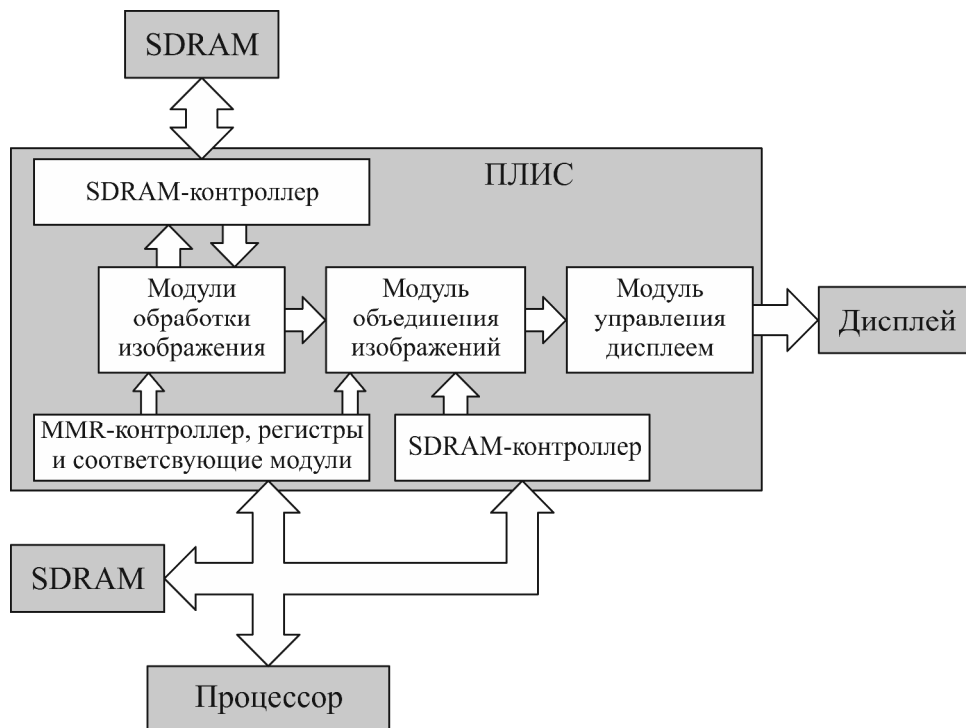


Рисунок 28 – Схема объединения изображения сцены со служебным кадром в ПЛИС

Служебный кадр состоит из элементов пользовательского интерфейса (меню и диалоговые окна), изображения прицельной шкалы, а также содержит различную служебную информацию, необходимую оператору в момент использования прибора, в виде текста и пиктограмм.

Служебный кадр прорисовывается процессором однократно и помещается в SDRAM память, откуда извлекается ПЛИС при объединении служебного кадра с кадрами изображения сцены. Адрес положения служебного кадра в SDRAM памяти сообщается ПЛИС через соответствующий регистр. При необходимости изменения кадра, например, при работе с меню, изменением положения прицельной шкалы, или изменением показаний датчиков, новый служебный кадр также помещается в SDRAM, а его адрес через регистр сообщается ПЛИС.

Одновременно в SDRAM хранится до трех служебных кадров. Два кадра используются для отображения на дисплее, а один – для прорисовки кадра процессором. Как только кадр оказывается полностью прорисованным, его адрес сообщается ПЛИС в качестве адреса служебного кадра. Первый из предыдущих кадров при этом начинает использоваться процессором в качестве свободного поля для прорисовки нового кадра. Буферизация трех кадров вместо одного необходима для обеспечения целостности изображения на дисплее – на дисплее не должен отображаться «недорисованный» кадр. При этом двух кадров для обеспечения целостности изображения тоже не достаточно, т.к. один из кадров является отображаемым в данный момент времени «старым» кадром, недокопированным в модуль объединения изображений, другой кадр – новый только что прорисованный служебный кадр, в дальнейшем отображаемый на дисплее, а третий кадр должен использоваться в качестве свободного поля для того, чтобы у процессора была возможность начать прорисовку очередного кадра.

Для упрощения создания служебного кадра и реализации пользовательского интерфейса в программе процессора специально был разработан набор функций, осуществляющих формирование простейших графических элементов:

- создание прямой линии с заданными координатами и заданным цветом;

- создание окружности с заданными координатами центра, радиусом и цветом;
- заливка заданного поля (прямоугольного или круглого) сплошным цветом;
- отображение текста;
- попиксельное копирование в служебный кадр пиктограммы из энергонезависимой памяти прибора;

и некоторые другие. Прорисовка служебного кадра осуществляется комбинацией функций. Помимо основных цветов для рисования элементов пользовательского интерфейса поддерживается режим полупрозрачности, позволяющий отображать диалоговые окна на экране прибора таким образом, чтобы не препятствовать одновременному наблюдению за обстановкой. Пример изображения представлен на рисунке 29.

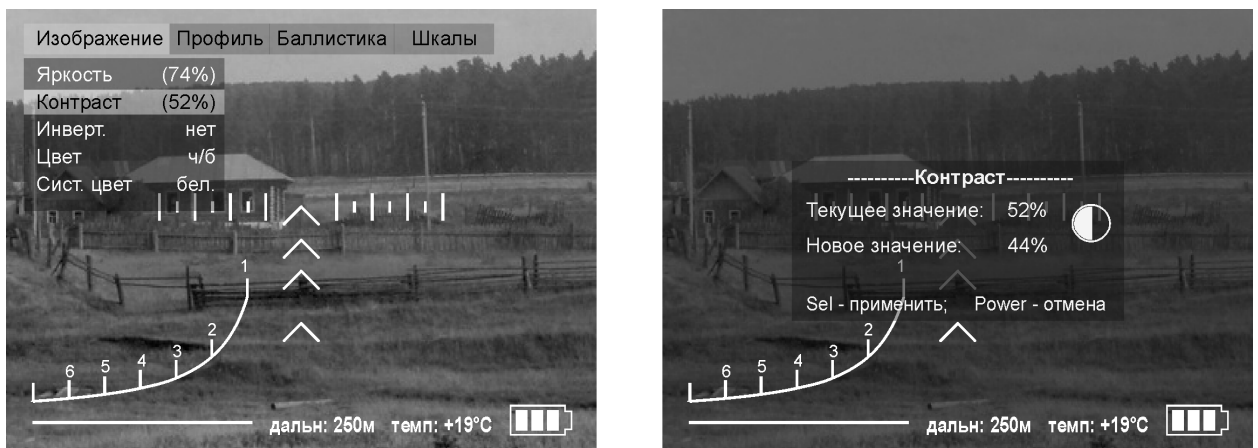


Рисунок 29 – Полупрозрачное отображение меню и диалоговых окон

Также в ПЛИС реализованы функциональные блоки, осуществляющие формирование управляющих сигналов ПЗС-фотоприемном и ПЗС-процессором – сигналы вертикальной и горизонтальной развертки, импульсы стирания и считывания, вспомогательные управляющие сигналы, а также модули, осуществляющие управление дисплеем прибора и передающие на дисплей итоговое изображение.

На рисунке 30 представлена структурная схема модуля, формирующего управляющие сигналы.

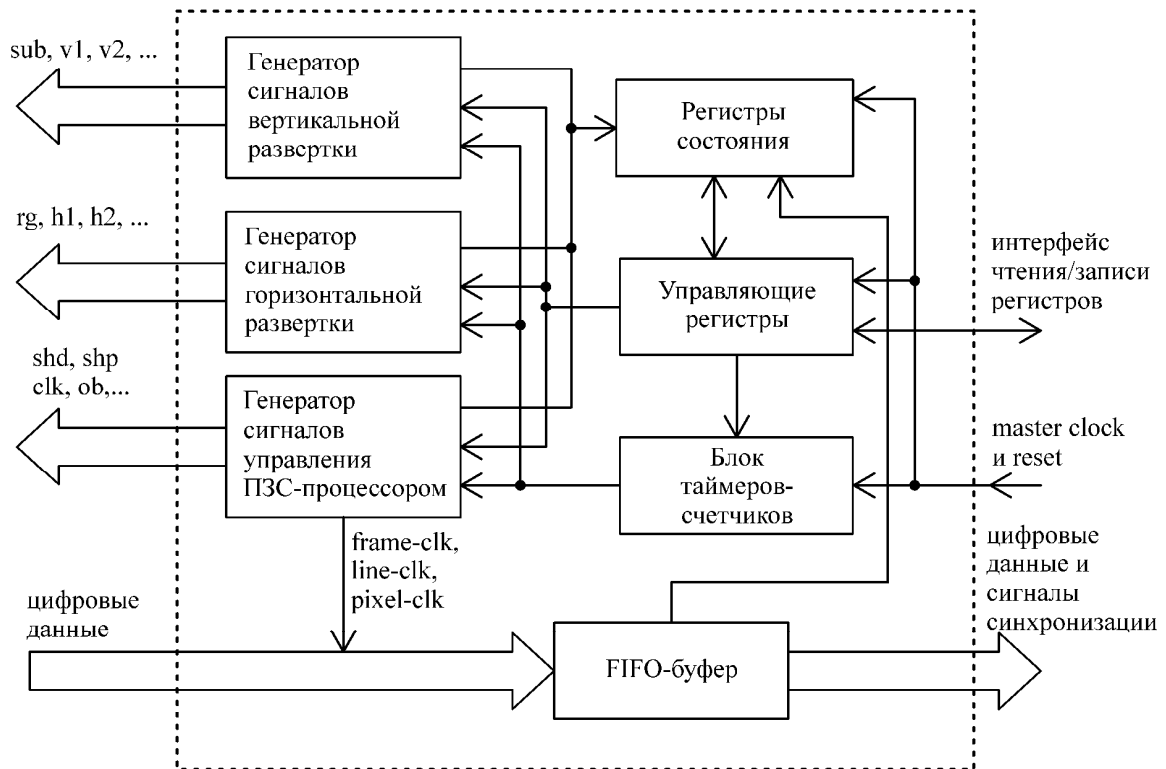


Рисунок 30 – Структурная схема модуля, осуществляющего формирование управляющих ПЗС-фотоприемником и ПЗС-процессором сигналов, и получение цифровых данных с ПЗС-процессора

Сигналы горизонтального переноса H1, H2 и RG необходимы для управления переносом зарядов в регистре вывода ПЗС-фотоприемника. Сигналы SHP и SHD подаются на ПЗС-процессор синхронно H1, H2 и RG с таким образом, чтобы их фронты приходились в нужные моменты времени – когда на выходе ПЗС-матрицы находятся уровень привязки или уровень значения пикселя. По переднему фронту сигнала CLK на выходе ПЗС-процессора формируются данные результата последней оцифровки сигнала CCD. В соответствии с документацией на используемый ПЗС-процессор [89] данные оцифровки запаздывают относительно аналогового сигнала на шесть тактов.

Временные интервалы сигналов вертикального переноса V1...V4, SUB и т.д. задаются генераторами, реализованными в ПЛИС, в соответствии с документацией на фотоприемник [72]. Необходимые напряжения обеспечиваются драйвером вертикальной развертки [92], согласующего выходы ПЛИС с входами фотоприемника.

На способ управления фотоприемником подана заявка на получение патента РФ на изобретение.

Разработанные программные модули, реализованные в ПЛИС, перед использованием в составе прибора тестировались на симуляторе с целью поиска и устранения всех возможных ошибок программного кода, ошибок интерпретации алгоритмов работы модулей, условий возникновения некорректного поведения модулей.

Для этой цели использовалось популярное приложение QuestaSim [121], являющееся комплексной платформой для верификации и отладки сложных проектов на языках описания аппаратуры, и позволяющее отладить не только программу ПЛИС, но также смоделировать поведение окружающих ПЛИС электронных элементов. В составе комплекса имеется стандартный набор средств отладки, таких как построение временных диаграмм, анализ синтаксиса полноты покрытия кода, построение графов потока данных и т.д.

Пример тестирования изображен на рисунке 31. По временным диаграммам, полученным при помощи симулятора, проверялась правильность формирования управляющих фотоприемником и ПЗС-процессором сигналов. Неправильная форма данных сигналов и несвоевременная подача управляющих напряжений может привести к неисправности фотоприемника, поэтому соответствующие модули перед запуском программы ПЛИС на плате тестировались при помощи симулятора, а диаграммы сигналов проверялись виртуально.

После исправления недочетов и успешного тестирования на симуляторе модули тестировались непосредственно на электронной плате прибора, проверялось их взаимодействие с остальными электронными компонентами. После успешного завершения тестирования окончательный вариант модулей загружался в ПЛИС в качестве ее микропрограммы.

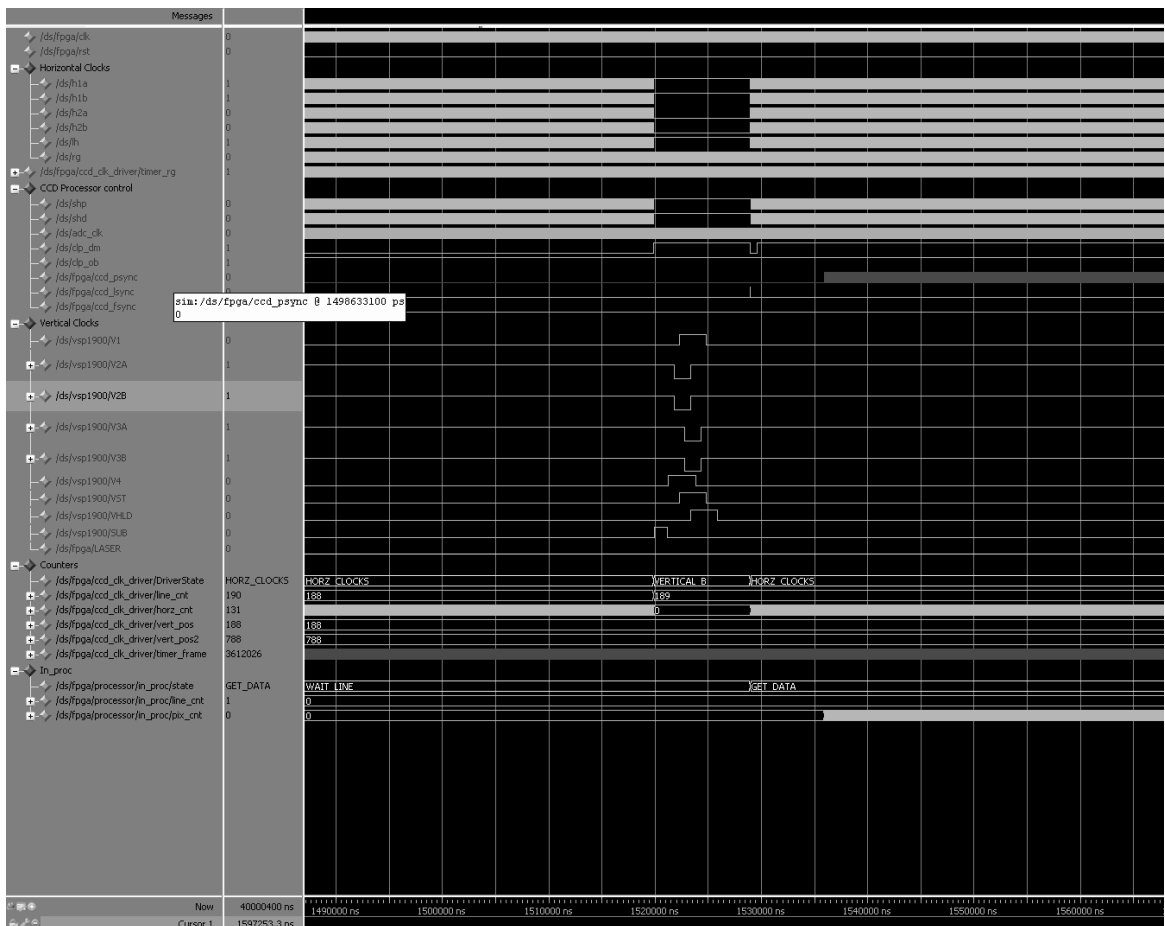
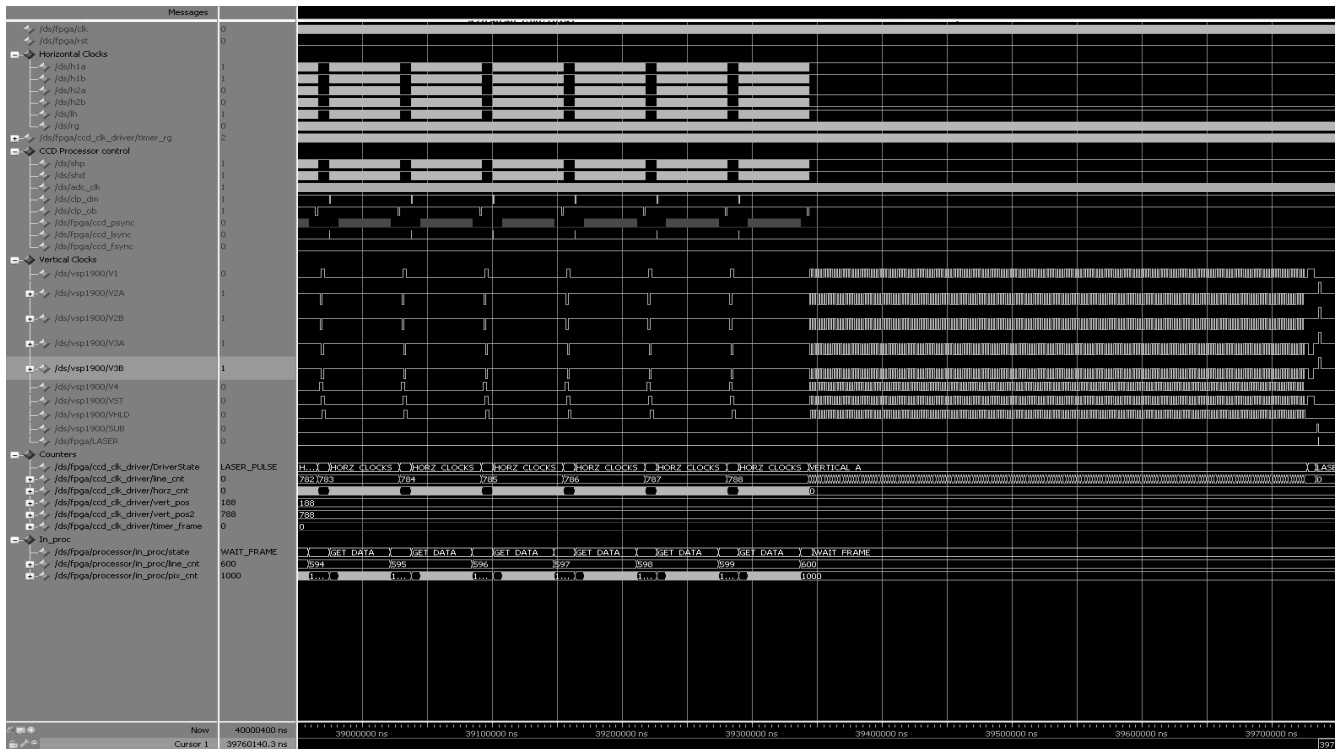


Рисунок 31 – Временные диаграммы сигналов, полученные при помощи симулятора

2.6 Преобразование изображений

Другой важной функцией модуля электроники является анализ и обработка изображений. Исходно происходит анализ «сырых» кадров изображения, получаемых с ПЗС-процессора, чтобы принять решение о том, каким образом изображение сцены может быть улучшено: какие действия необходимо произвести, чтобы повысить информативность изображения и сделать его более комфортным для наблюдения оператором. Улучшено изображение может быть несколькими ортогональными друг другу способами.

Во-первых, процессор анализирует, насколько может быть изменен коэффициент усиления в аналоговом тракте ПЗС-процессора. Коэффициент усиления должен быть таким, чтобы амплитуда аналогового сигнала, получаемого с ПЗС-фотоприемника в пределах одного кадра соответствовала максимально допустимому значению напряжения на входе аналого-цифрового преобразователя, не приводящему к насыщению. Иными словами требуется подобрать коэффициент усиления, обеспечивающий максимально возможный динамический диапазон оцифрованного изображения. Вычисленное значение с (точностью до возможно используемого в соответствии с документацией [89]) процессор передает ПЗС-процессору, через модуль взаимодействия с ПЗС-процессором, реализованный в ПЛИС.

Во-вторых, процессор осуществляет управление временем экспозиции фотоприемника. В зависимости от освещенности наблюдаемой сцены на фотоприемник может приходиться разный световой поток. Соответственно, возникает необходимость изменения экспозиции – ее уменьшение в случае избыточной освещенности, чтобы не происходило насыщение фотоприемника, и увеличение в случае недостаточной освещенности, чтобы повысить информативность наблюдаемого изображения. Время экспозиции при управлении используемым фотоприемником ICX445 изменяется путем изменения времени между двумя управляющими импульсами стирания и считывания [72]. Необходимая величина рассчитывается процессором и передается модулю,

осуществляющему формирование управляющих ПЗС-фотоприемником сигналов, через регистры ПЛИС.

Третий способ – изменение полученного изображения в цифровом виде с применением различных алгоритмов цифровой обработки [122]. Для преобразований кадров сцены в ПЛИС используются несколько модулей обработки изображений, каждый из которых осуществляет изменение изображения по заданному алгоритму. Модули условно можно представить как соединенные последовательно элементы единого конвейера [123], осуществляющие обработку изображения. Схематичное изображение последовательного соединения показано на рисунке 27. Изображенное подключение модулей друг к другу не является жестко установленным, и может конфигурироваться в зависимости от условий наблюдения и выбранных наборов алгоритмов обработки изображений. В частности, может быть изменена последовательность выполняемых над изображением операций, а часть модулей может быть выведена из состава конвейера из-за отсутствия необходимости их использования в конкретном случае. Последовательность включения модулей определяется процессором и управляется состоянием регистров ПЛИС.

Операции, выполняемые модулями обработки изображения, варьируются от самых простых, таких как поэлементное сложение или вычитание значений яркости, умножение на коэффициент, инверсия, до относительно сложных операций, таких как вычисление значения яркости элемента при интерполяции окружающих пикселей, вычисление значения по полиному, применение гистограммного фильтра и т.д.

Следует различать обработку изображений, предназначенных для зрительного восприятия, и обработку в устройствах автоматического анализа [80]. Так как прицел в первую очередь является прибором наблюдения, и все решения, связанные с интерпретацией наблюдаемого изображения, принимает оператор, в тракте обработки изображений модуля электроники реализованы алгоритмы, улучшающие качество изображения, оцениваемое визуально. Не ставится задача сохранения свойств оригинального изображения, например, итоговое

изображение, передаваемое на дисплей или внешние устройства, не может быть использовано для измерений яркостей и интенсивностей свечения наблюдаемых объектов, для сравнительного анализа их освещенностей и т.д.

Процедуру, обеспечивающую представление результатов обработки данных в виде изображения, выводимого на экран для использования наблюдателем, называют визуализацией [124]. Желательно при помощи обработки придать выводимому изображению такие качества, благодаря которым его восприятие человеком было бы по возможности комфортным. Часто бывает полезным подчеркнуть, усилить какие-то черты, особенности, нюансы наблюдаемой картины с целью улучшения ее субъективного восприятия.

Субъективность восприятия сильно усложняет применение формализованного подхода при решении задачи. Поэтому при обработке изображений с целью визуализации в настоящее время получили распространение методы, в которых часто отсутствуют строгие математические критерии оптимальности. Их заменяют качественные представления о целесообразности той или иной обработки, опирающиеся на субъективные оценки результатов [124].

Для улучшения наблюдаемого изображения в модуле электроники прибора используется несколько способов обработки изображения, подробное описание которых приведено в [79, 80, 122, 124–127]. Среди них:

- изменение контраста;
- видоизменение гистограммы;
- подавление шумов;
- масштабирование изображения;

Задача контрастирования связана с улучшением согласования динамического диапазона изображения и экрана, на котором выполняется визуализация. К повышению контраста необходимо прибегать тогда, когда кадр изображения занимает по тем или иным причинам только часть отведенного ему диапазона значений.

При контрастировании используется линейное поэлементное преобразование вида:

$$s = a \cdot r + b, \quad (8)$$

параметры a и b которого определяются желаемыми значениями минимальной и максимальной выходной яркости. Здесь и далее используются обозначения величин, принятые в [122]. Под r понимаются значения пикселей изображения до обработки, а под s – значения пикселей с теми же координатами после обработки.

В приборе для цифрового представления каждого отсчета изображения отводится 12 бит. Соответственно, входной и выходной сигналы могут принимать одно из 4096 значений. Значение 0 соответствует при визуализации уровню черного, а значение 4095 – уровню белого. Предположим, что минимальная и максимальная яркости исходного изображения равны 2500 и 4000 соответственно. Если эти параметры или один из них существенно отличаются от граничных значений яркостного диапазона, как в предложенном примере, то визуализированная картина выглядит как ненасыщенная и неудобная при наблюдении.

Пример контрастирования представлен на рисунке 32.



Рисунок 32 – Применение изменения контраста
(слева исходное изображение, справа с измененным контрастом)

Сравнение двух изображений свидетельствует об улучшении визуального качества изображения. Улучшение связано с использованием после контрастирования полного динамического диапазона экрана, что отсутствует у исходного изображения.

Помимо одинакового изменения значений яркостей всех элементов изображения в цифровом прицеле используются методы, связанные с изменением гистограммы изображения.

Гистограммой цифрового изображения с уровнями яркости в диапазоне $[0, L-1]$ называется дискретная функция $h(r_k) = n_k$, где r_k есть k -ый уровень яркости, а n_k – число пикселей на изображении, имеющих яркость r_k , где $k = 0, 1, \dots, L-1$ [122]. Общей практикой при описании систем обработки изображений является нормализация гистограммы путем деления каждого из ее значений на общее число пикселей n . Таким образом, значения нормализованной гистограммы будут $p(r_k) = n_k / n$ для $k = 0, 1, \dots, L-1$. Иными словами, $p(r_k)$ есть оценка вероятности появления пикселя со значением яркости r_k .

Гистограммы являются основой для многочисленных методов пространственной обработки изображений, а видоизменение гистограммы (гистограммная обработка) используется для улучшения изображений [122].

Если представить гистограмму изображения непрерывной функцией распределения значения r , отражающего яркость элементов изображения, в диапазоне $[0, 1]$ (значение $r=0$ соответствует черному, а $r=1$ – белому), то для любого r , удовлетворяющего вышеуказанным условиям, рассматривается преобразование вида

$$s = T(r) \text{ при } 0 < r < 1 \quad (9)$$

которое для любого пикселя, имеющего значение r , дает значение s . Функция преобразования $T(r)$ является однозначной и монотонно возрастающей на интервале $0 \leq r \leq 1$. Требование однозначности функции $T(r)$ необходимо для существования обратного преобразования, а требование монотонности – для сохранения порядка изменения яркостей от черного к белому на выходном изображении. Кроме того, $0 \leq T(r) \leq 1$ при $0 \leq r \leq 1$, так как допустимый диапазон выходных значений сигнала совпадает с диапазоном входных значений.

Обратное преобразование из s в r будет следующим:

$$r = T^{-1}(s) \text{ при } 0 < r < 1 \quad (10)$$

Уровни яркости на изображении могут рассматриваться как значения случайной величины в интервале $[0, 1]$. Одной из важнейших характеристик случайной величины является плотность распределения вероятностей. Пусть $p_r(r)$ и $p_s(s)$ означают плотности распределения вероятностей случайных переменных r и s , соответственно, где индекс при p означает, что $p_r(r)$ и $p_s(s)$ являются разными функциями. Из теории вероятностей следует, что если $p_r(r)$ и $T(r)$ известны, то плотность распределения вероятностей $p_s(s)$ значений преобразованного сигнала s может быть получена с помощью формулы:

$$p_s(s) = p_r(r) \left| \frac{dr}{ds} \right| \quad (11)$$

то есть, плотность распределения вероятностей значений преобразованного сигнала s задается плотностью распределения вероятностей значений яркостей входного изображения и выбранной функцией преобразования [122].

В обработке изображений особую важность имеет следующая функция:

$$s = T(r) = \int_0^r p_r(w) dw \quad (12)$$

где w – переменная интегрирования. Правая часть уравнения (12) есть не что иное, как функция распределения случайной переменной r .

В [122] приводятся доказательства того, что $p_s(s)$ есть равномерная плотность распределения вероятностей на отрезке $[0, 1]$, равная нулю вне данного интервала, и что выполнение преобразования согласно функции, заданной уравнением (12), приводит к получению некоторой случайной величины s , характеризующейся равномерной плотностью распределения вероятностей.

В случае дискретных значений, вместо плотностей распределения вероятностей и интегралов мы имеем дело с вероятностями конкретных значений и суммами. Вероятность появления пикселя со значением яркости r приблизительно равна

$$p_r(r_k) = \frac{n_k}{n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (13)$$

где, n – общее число пикселей на изображении, n_k – число точек яркости r_k , а L – максимально допустимое число уровней яркости на изображении.

Дискретным аналогом функции преобразования, задаваемой уравнением (12), является

$$s_k = T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) = \sum_{j=0}^k \frac{n_j}{n}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, L-1 \quad (14)$$

Таким образом, обработанное (выходное) изображение является результатом преобразования каждого пикселя входного изображения, имеющего яркость r_k , в соответствующий элемент выходного изображения со значением s_k согласно уравнению (14). Как указывалось ранее, зависимость $p_r(r_k)$ от r_k называется гистограммой. Преобразование (отображение), задаваемое уравнением (14), называется эквализацией гистограммы [122].

Необходимость неодинакового изменения яркостей каждого элемента изображения бывает полезным при одновременном нахождении в поле зрения прибора темных и ярких объектов. При применении простого алгоритма автоконтраста, информативность отображаемого изображения может резко снизиться за счет того, что появившийся яркий объект начинает маскировать детали фона, уводя его в «недосвет» или «пересвет». Пример изображения и схематичное изображение его гистограммы приведены на рисунке 33.

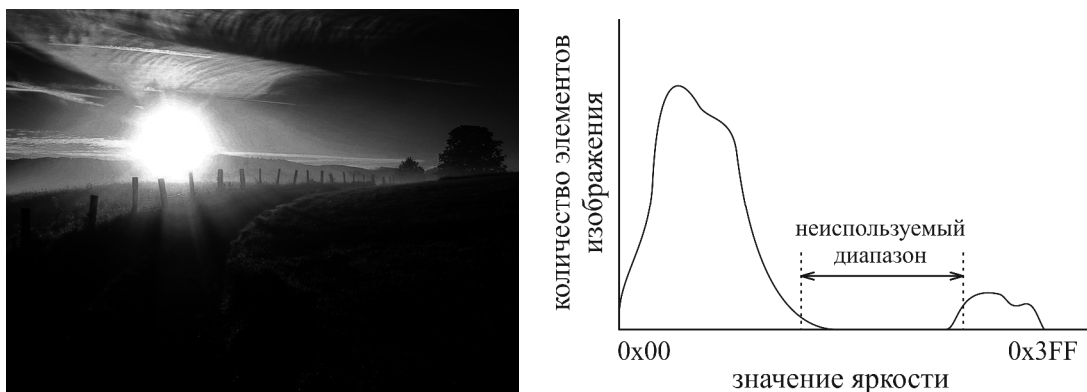


Рисунок 33 – Пример изображения, с эффектом «недосвета» при использовании алгоритма автоматического контраста и гистограмма этого изображения

Характерным признаком появления этого эффекта является ярковыраженная двухмодальность гистограммы изображения при значительно разнесенных друг

относительно друга пиках интенсивности излучения. Причиной возникновения эффекта является неэффективное использование доступного диапазона градаций устройства отображения

Частично улучшить изображение можно повысив его яркость, т.е. «растянуть» гистограмму таким образом, чтобы элементы, входящие в состав первой группы занимали не нижний диапазон значений, а как минимум половину этого диапазона. При этом значения яркостей остальных элементов увеличиваются пропорционально увеличению значений элементов первой группы, что приводит к тому, что эти значения начинают превышать максимально допустимую величину, что физически не возможно, поэтому яркости данных элементов изображения входят в насыщение (рисунок 34).

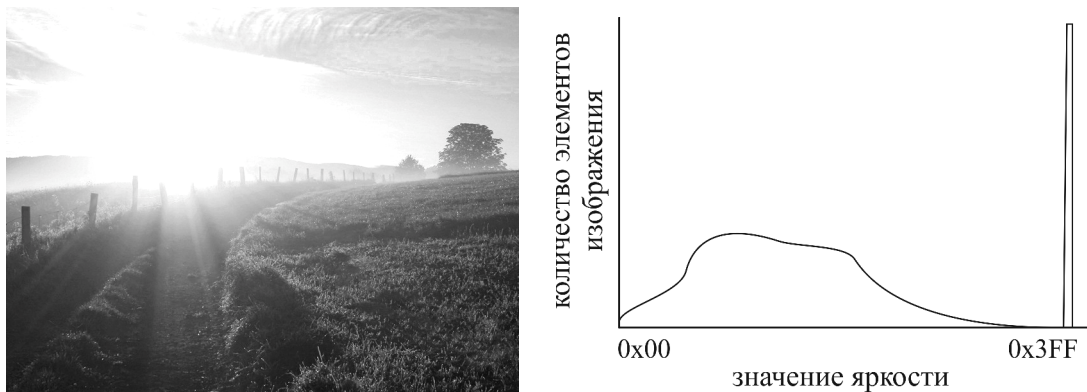


Рисунок 34 – Результат повышения яркости изображения с улучшением восприятия одного его фрагмента и уходом в «насыщение» другого фрагмента

Другими словами, в результате обработки визуальное восприятие одних его фрагментов (трава и тропинка) улучшились, а других (облака, освещенные Солнцем столбы и само Солнце) ухудшилось.

Для правильной коррекции необходимо провести кусочно-линейное выравнивание (эквализацию) гистограммы [128, 130]. В этом случае значения яркостей элементов изменяются не одинаково, а в зависимости от того, в какой из групп данный элемент находится на гистограмме. Кусочно-линейное изменение гистограммы равномерно распределяет уровни интенсивности изображения по градациям яркости устройства отображения и при этом не выводит отдельные элементы в насыщение, что позволяет увеличить общую информативность

изображения прибора, а не информативность одной области изображения в ущерб информативности других областей.

Пример кусочно-линейного видоизменения гистограммы изображения и результат преобразования приведены на рисунке 35.

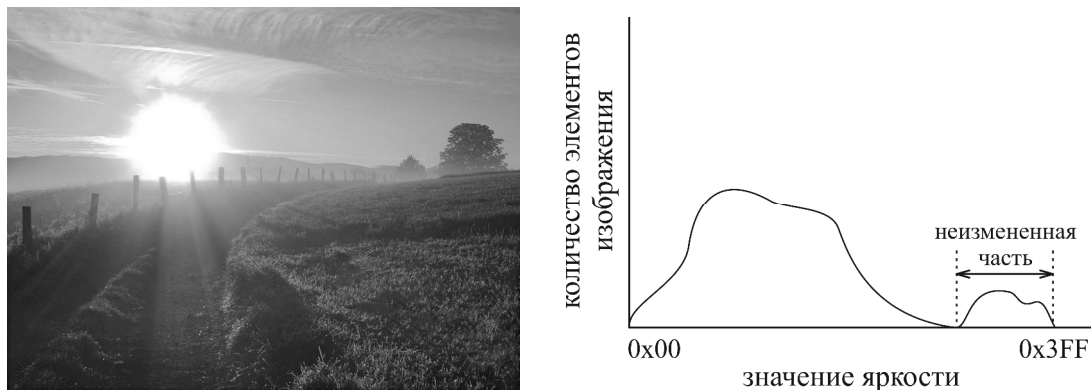


Рисунок 35 – Применение кусочно-линейного изменения контраста изображения

Существуют также иные методы преобразования изображений, например, соляризация и препарирование по различным функциям, описанные в [124, 126], однако, при проверке данных методов на динамических сценах на практике, они никак не зарекомендовали себя. Также экспериментально было установлено, что применение нелинейных поэлементных преобразований изображения, таких как логарифмическое преобразование, преобразование по степени или корню [122] никаких преимуществ по сравнению с линейными алгоритмами эквализации гистограммы для визуального улучшения изображения не дает. Поэтому в окончательной версии модуля электроники цифрового прицела данные методы изменения изображения не используются.

Традиционно используемая в системах видеонаблюдения гамма-коррекция (преобразование изображения по степенному закону [122]) для компенсации нелинейности яркости изображения на мониторе в модуле электроники прицела также не реализована. Необходимости в ее программной реализации нет, так как функция гамма-коррекции аппаратно реализована непосредственно в дисплее [74], используемом в составе прибора.

Обычно изображения, сформированные различными информационными системами, искажаются действием шумов и помех [124, 129]. Изображение,

получаемое цифровым прицелом, не является исключением, поэтому в некоторых условиях анализ изображения оператором, использующим прибор, может быть затруднен.

Помехи на изображении могут возникать из-за взаимного влияния электронных комплектующих друг на друга, расположенных на одной плате с фотоприемным устройством и элементами, осуществляющими аналого-цифровое преобразование получаемого с фотоприемника сигнала [113]. Другая причина возникновения помех заключается в использовании в составе схемы импульсных источников питания. И те и другие помехи являются устранимыми. В первом случае устранения помехи можно добиться правильным взаиморасположением элементов на плате, во втором случае – применением в цепях питания различных, в том числе активных, фильтров [111].

Причина шумов на изображении заключается в «шумности» самого фотоприемника. Основные шумы обусловлены темновым током ПЗС-фотоприемника, являющимся результатом спонтанной генерации электронно-дырочных пар [28], и шумом его выходного усилителя.

У современных ПЗС-фотоприемников, к которым относится примененный в составе цифрового прицела фотоприемник ICX445, шумы на изображении проявляются только на малоконтрастных сценах. В нормальных условиях действие шумов на фоне наблюдаемых объектов пренебрежимо мало. Но в условиях наблюдения при низкой освещенности подавление шумов также становится актуальным.

Программно ослабление действия шумов достигается цифровой фильтрацией. При фильтрации яркость каждого пикселя исходного изображения, искаженного помехой, заменяется некоторым другим значением яркости, которое признается в наименьшей степени искаженным шумом [124].

Общепринято при решении этой задачи опираться на использование вероятностных моделей изображения и шумов, а также на применение статистических критериев оптимальности. Причины этого понятны – случайный характер как информационного сигнала, так и шума и стремление получить

минимальное в среднем отличие результата обработки от идеального сигнала. Многообразие методов и алгоритмов связано с большим разнообразием сюжетов, которые приходится описывать различными математическими моделями. Кроме того, применяются различные критерии оптимальности, что также ведет к разнообразию методов фильтрации. [124]

При обработке видеопоследовательностей, состоящих из кадров изображения одной и той же сцены, появляется дополнительная возможность повышения качества изображения за счет применения методов подавления шума, основанных на совместном анализе нескольких изображений одной и той же сцены [131].

Одним из способов уменьшения шумов на изображении является усреднение или сложение (что равнозначно, так как после объединения кадров происходит процедура изменения контраста итогового изображения) нескольких идущих подряд кадров изображения. В [122] показано, что поэлементное сложение n кадров изображения позволяет уменьшить шумы в \sqrt{n} раз.

Сложение нескольких кадров является дискретным аналогом непрерывного накопления, но в отличие от увеличения времени экспозиции позволяет получать итоговые кадры изображения непрерывно, а не через интервалы, равные времени экспозиции. Тем не менее, при низкой освещенности уровень полезного сигнала может оказаться меньшим или соизмерим с уровнем сигнала, являющимся ошибкой квантования – в этом случае предпочтительней использовать «аналоговое» сложение кадров за счет увеличения времени экспозиции.

В приборе реализованы оба способа, являющиеся взаимодополняющими друг друга. При относительно низкой освещенности осуществляется увеличение времени экспозиции, снижающее общую кадровую частоту до десяти, пяти или одного кадра в секунду (в зависимости от настроек прибора). Дальнейшего снижения кадровой частоты не осуществляется. В цифровом виде складывается от двух до пяти полученных кадров изображения в зависимости от условий наблюдения.

Программно предусмотрено принудительное увеличение времени экспозиции до нескольких секунд по желанию оператора, однако такая величина

предусмотрена только в ручном режиме работы модуля обработки изображений прибора.

Для подавления шумов существуют также различные сглаживающие пространственные фильтры, алгоритмы рекуррентной фильтрации, медианные фильтры, подробно описанные в [122, 124–127]. Однако экспериментально было установлено, что применение подобных фильтров неизбежно приводит к потере малоразмерных деталей изображения, также представляющих интерес в качестве потенциальных целей при наблюдении. При этом наличие различных динамически меняющихся точек или пятен на изображении, вызванных шумом, неудобства для наблюдения не доставляют.

Здесь полезно отметить определенное разногласие в оценках качества, даваемых человеческим глазом и применяемыми количественными показателями [124]. Глаз является слишком совершенным изобретением природы, чтобы с ним могли соревноваться достаточно примитивные математические показатели типа среднего квадрата ошибок. Это вовсе не означает, что математические критерии непригодны при цифровой обработке изображений – цифровая обработка изображений находит применение в различных информационных системах с автоматическим принятием решений, основанным на этой обработке. Там где качество работы системы оценивается только математическими показателями, их функционирование должно быть подчинено математическим критериям [124].

К таковым системам цифровой прицел не относится, так как изображение, получаемое прибором, анализируется оператором, и решение оператора является решающим. По этой причине было принято решение отказаться от процедур фильтрации изображения, улучшающих его качество с математической точки зрения, но ухудшающих информативность изображения с точки зрения наличия на нем малоразмерных деталей.

2.7 Объектив

Низкоуровневый визирный канал на базе ПЗС-фотоприемника является компромиссным вариантом при использовании в составе прицела. Уступая при низкой освещенности (менее $4 \cdot 10^{-3}$ лк) приборам ночного видения на электронно-оптических преобразователях по чувствительности, а в дневное время телескопическому каналу по разрешению, цветности и динамическому диапазону наблюдаемого изображения сцены, он обеспечивает возможность круглосуточной работы, и, что особенно важно, может работать в сумерках, когда прибор ночного видения «еще не видит», а классический оптический прибор «уже не» позволяет оператору наблюдать обстановку [51].

Преимуществом использования кремниевого фотоприемника в цифровом прицеле является его продленная в ИК область чувствительность, важная в сумеречное время из-за резко возрастающего коэффициента отражения светового излучения зеленой растительностью в диапазоне длин волн более 0,8 мкм. На рисунке 36 изображен график спектральной зависимости коэффициента отражения растительности, приведенный в [3].

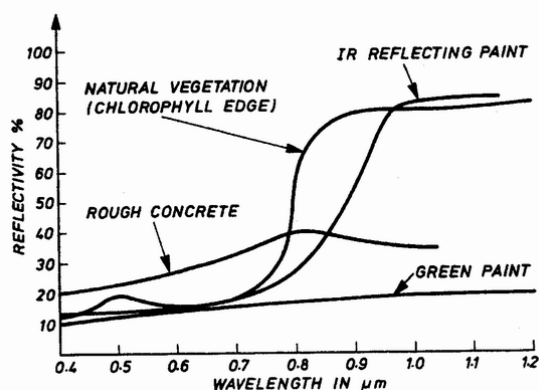


Рисунок 36 – Спектральная зависимость коэффициентов отражения растительности

Используемый в составе цифрового прицела ПЗС-фотоприемник ICX445ALA имеет чувствительность в диапазоне длин волн до 0,9 мкм. На рисунке 37 изображен график чувствительности фотоприемника, приведенный в [72].

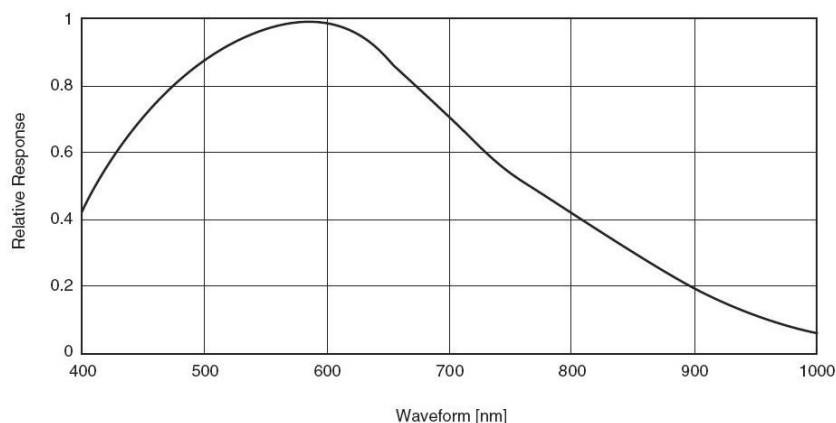


Рисунок 37 – График спектральной чувствительности ICX445ALA

Для реализации широкого спектрального диапазона фотоприемника от 0,4 до 0,9 мкм, необходима разработка линзового объектива класса суперапохромат, с хроматизмом положения, исправленным для четырех длин волн, и высоким относительным отверстием.

Исправление хроматизма и для коротких, и для длинных волн необходимо для обеспечения разрешения получаемого фотоприемником изображения.

Относительное отверстие менее 1:2 не позволит прибору устойчиво работать при освещенностях менее $4 \cdot 10^{-3}$ лк, а большее чем 1:1,5 повлечет слишком малую глубину резкости изображаемого пространства и необходимость подфокусировки объектива при дальности наблюдения до 100 м. Подфокусировка, в свою очередь, требует применения в составе прибора механизмов обеспечивающих стабильность визирной оси прицела. Помимо увеличения сложности конструкции и массы прибора это влечет за собой необходимость проведения мер по герметизации подвижных соединений, также отрицательно влияющих на массу прицела и его надежность.

Разработка линзового объектива с относительным отверстием от 1:2 до 1:1,5 с указанным спектральным диапазоном является сложной задачей. В частности, подобный спектральный диапазон приборов ночного видения на базе электронно-оптических преобразователей поколения 2+, не обеспечивается линзовыми объективами, а попросту «отрезается» по краям фильтрами. Но для цифрового прицела важно сохранить длинноволновую часть спектра, поскольку на длинах волн 0,8–0,9 мкм резко возрастает коэффициент отражения излучения зеленой

растительностью [3], за счет чего падение чувствительности ПЗС-фотоприемника в четыре раза в данном диапазоне (рисунок 37), оказывается скомпенсированным четырехкратным ростом коэффициента отражения по потоку, и значительно большим ростом по контрасту.

Оптическая схема должна реализовывать поле зрения ПЗС-фотоприемника ICX445 величиной 5×6 мм, и геометрическое пятно рассеяния не превышающее размера элемента матрицы 3,75 мкм [72], во всем используемом спектральном диапазоне.

Для реализации максимальной дальности распознавания наблюдаемых объектов типа «человек» или «животное», прибору необходимо большее фокусное расстояние объектива, которое ограничивается требованием по максимальным углам стрельбы.

Фокусное расстояние порядка 20–50 мм обеспечивает необходимую дальность распознавания для фотоприемника форматом 1280×960 элементов и с шагом элементов $\Delta = 3,75$ мкм. Для прицела важна возможность равномерной прорисовки прицельных шкал, обеспечивающих возможность стрельбы с учетом поправок стрельбы за счет шкал, поэтому оптимальное фокусное расстояние объектива прибора должно обеспечивать угловой размер пикселя кратный десятым долям тысячной дистанции.

Фокусное расстояние $F = 37.5$ мм, обеспечивает угловой размер пикселя

$$d = \frac{1000 \cdot \Delta}{F} = \frac{3,75}{37,5} = 0,1 \text{ тД} \quad (15)$$

и достаточное количество строк

$$Y = \frac{1000h}{d \cdot S} = \frac{1000 \cdot 1,7}{0,1 \cdot 1500} = 11 \quad (16)$$

на цели типа «человек» на дальности 1500 м. Поле зрения при этом составляет

$$dX \times dY = 1280 \cdot 0,1 \times 960 \cdot 0,1 [\text{тД}] = 128 \cdot 0,06 \times 96 \cdot 0,06^\circ = 7,7 \times 5,8^\circ \quad (17)$$

что меньше требуемого значения по полю зрения в 10° по вертикали с учетом запаса на выверку и внесение поправок.

При выборе объектива с фокусным расстоянием 18,75 мм, обеспечивается вдвое большее поле зрения $15,3 \times 11,5^\circ$, которое позволяет учесть большие углы стрельбы. Угловой размер пикселя изображения при этом составляет 0,2 тд. Наблюдаемое в дисплей разрешением 800×600 элементов поле зрения составляет $9,6 \times 7,2^\circ$.

Критерием геометрического разрешения цели принят классический критерий Джонсона для приборов ночного видения [3], требующий различения 4 пар штрихов эквивалентной миры на высоту объекта, что соответствует 8 строкам ТВ изображения. Размеры цели типа «человек» – 1,7 м. С выбранным фокусным расстоянием, фотоприемник с шагом элементов равным 3,75 мкм обеспечивает 11 строк изображения на высоту человека, наблюдаемого с расстояния 1000 м:

$$Y = \frac{1000h}{d \cdot S} = \frac{1000 \cdot 1,7}{0,2 \cdot 1000} = 8,5 \quad (18)$$

или ровно 8 строк, если округлить до целого в меньшую сторону. Эта величина достаточна для выполнения критерия Джонсона при достаточной освещенности на ярком фоне, при условии обеспечения оптикой пятна рассеяния точки не хуже размера элемента фотоприемной матрицы.

На расчет объектива было сформулировано соответствующее задание. Сам расчет производится коллективом сотрудников Филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «КТИПМ». Расчет показал возможность реализации объектива с относительным отверстием 1:1,8 в спектральном диапазоне 0,48–0,9 мкм (рисунки 38 и 39). Расчет производился при помощи программы оптических расчетов Zemax [132].

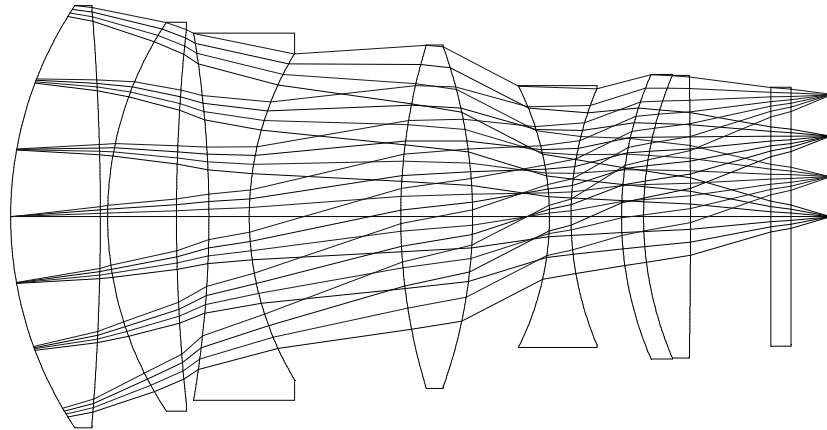


Рисунок 38 – Состав объектива-суперапохромата

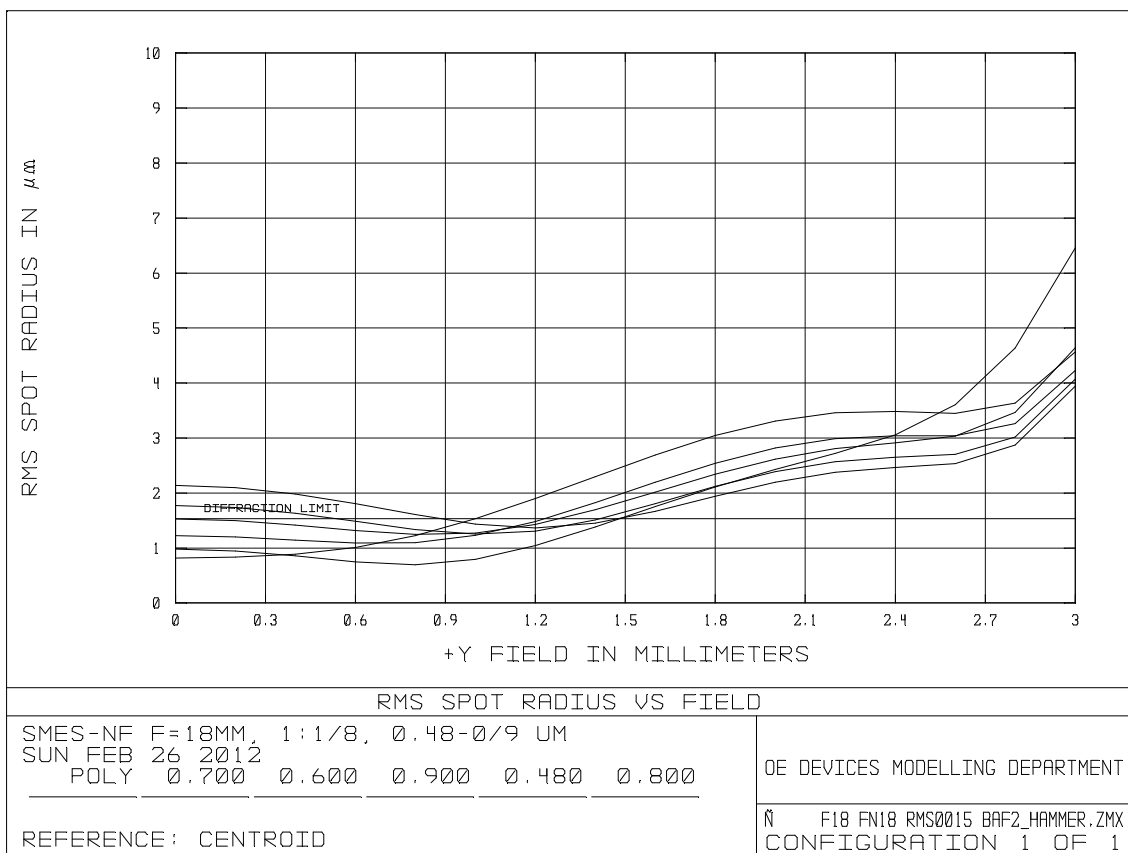


Рисунок 39 – Среднеквадратичный радиус пятна рассеяния точки по линейному полю зрения 3 мм в спектральном диапазоне 0,48–0,9 мкм

По расчетам пятно рассеяния точки на оси соответствует размеру элемента фотоприемной матрицы ICX445 и дифракционному пределу разрешения, а по полю находится в пределах 6 мкм. Общая масса оптических элементов составляет 3 г. Длина объектива составляет 21,5 мм.

2.8 Устройство отображения, конструкция окуляра

Формирователь изображения прибора представляет собой микромонитор и формирующую оптическую систему. Основными критериями при выборе микромонитора являлись количество отображаемых микромонитором полутонов – «чем больше, тем лучше», а также способность работать при низких температурах (до -40°C). Менее значимыми критериями при выборе микромонитора являлись его разрешение – не менее 800×600 элементов, и наличие цифрового входа для передачи изображения от основной платы прибора.

Выбор конкретного микромонитора был остановлен на матрице органических светодиодов SVGA060, производства Opto-Electronic Technology, удовлетворяющей упомянутым требованиям. Технические характеристики микромонитора представлены в [74]. На рисунке 40 приведено изображение микродисплея.

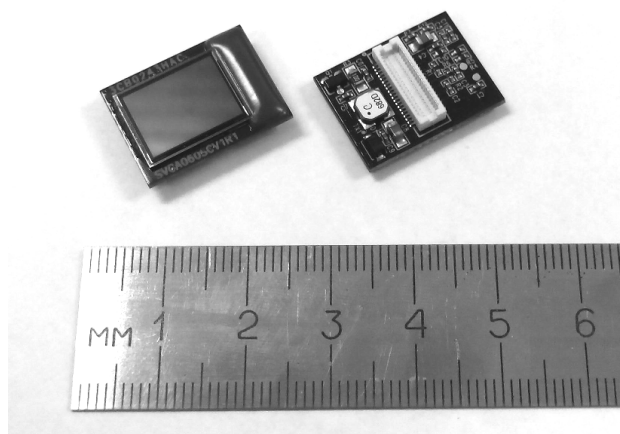


Рисунок 40 – Внешний вид микромонитора SVGA060

Для наблюдения изображения микромонитор должен быть снабжен окуляром. Во-первых, при наблюдении изображения необходимо обеспечить рабочее расстояние от глаза до прибора, называемое удалением выходного зрачка, достаточное, чтобы в момент выстрела не происходило травмирования стрелка корпусом прицела за счет отдачи оружия. Во-вторых, для комфортного наблюдения изображение с дисплея небольших размеров должно быть оптически увеличенным.

Из нескольких типов окуляров выбор был остановлен на схеме построения ретинального дисплея [65, 66, 133], формирующего изображение непосредственно на сетчатке глаза наблюдателя. В окулярах классической конструкции изображение формируется непосредственно перед глазом наблюдателя, что заставляет его постоянно фокусировать глаз на определенной глубине.

Оптические прицелы и приборы наблюдения, имеющие в своем составе окуляры классической конструкции, лишены этого недостатка по той причине, что при наблюдении глаз фокусируется на наблюдаемых объектах. Эти объекты расположены на значительном по сравнению с размерами прибора расстоянии, в отличие от микромонитора, расположенного внутри цифрового прицела достаточно близко к глазу наблюдателя.

Известно, что изображение окружающей среды, получаемое от камеры, снабженной оптическим объективом, не соответствует естественному зрительному восприятию той же среды человеком [134]. Применение так называемого виртуального сферического экрана [133] позволяет устранить искажения естественного восприятия объектов при больших полях зрения на малом расстоянии за счет соответствия физиологии и психологии зрительного восприятия. При таком способе отображения точечные элементы изображений объектов располагаются на сферической поверхности (рисунок 41), центр которой совмещен с центром вращения глаза. Система обладает центральной симметрией в отличие от осевой симметрии в окуляре с оптической линзой.



Рисунок 41 – Сферический экран вокруг глаза

Способ преобразования изображения с плоской поверхности дисплея в сферическое изображение описан в [135]. Схема окуляра с виртуальным сферическим экраном изображена на рисунке 42.

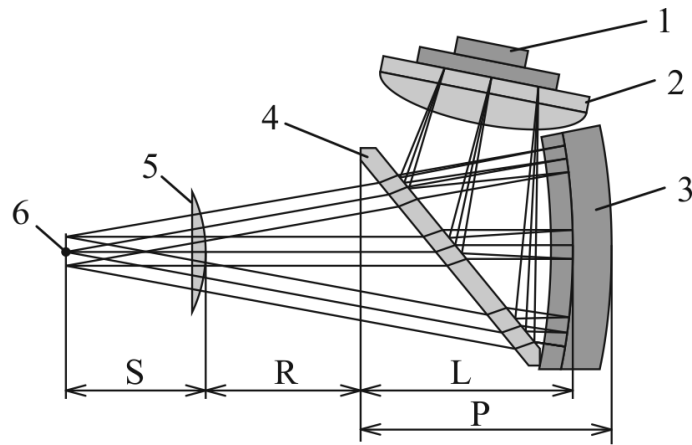


Рисунок 42 – Схема окуляра цифрового прицела. Пояснения в тексте

Световые пучки от точек изображения дисплея 1 через фокусирующую линзу 2 поступают на поверхность сферического вогнутого зеркала 3 при помощи полупрозрачного плоского зеркала 4. Центр виртуальной сферической поверхности оптически совмещен с центром вогнутого зеркала 3. Если центр вогнутого зеркала 3 совпадает с центром вращения глаза 6, то получается широкоугольная анаберрационная система. На рисунке 42 дополнительно обозначены S – расстояние от центра вращения глаза до роговицы 5, R – вынос зрачка, L – расстояние от ближней к глазу кромки светоделительной пластины до плоскости, определяющей световой диаметр зеркала, P – продольный размер окуляра. Сферическая aberrация ничтожно мала, если диаметр зрачка глаза составляет 2–3 мм, а радиус зеркала не менее 50 мм [136]. Так как такая система требует изображений, располагаемых на сферической фокальной поверхности зеркала, а микродисплей 1 имеет плоское изображение, в схеме использован положительный коллектив 2, преобразующий плоские изображения в сферические поможет, и располагаемый в непосредственной близости от плоского изображения. Aberrации линзы и зеркала противоположны по знаку, и могут компенсировать друг друга, уменьшая общие aberrации окуляра.

На рисунке 43 представлено объемное изображение модели окуляра. Внешний вид окуляра прицела представлен на рисунке 44. На фотографии дисплей изображен перевернутым для удобства восприятия. Реальное расположение дисплея в приборе «наклоном вниз», как на модели, изображенной

на рисунке 43, и схеме, представленной на рисунке 42. На рисунке 44 справа представлена фотография расположения микромонитора внутри окуляра.

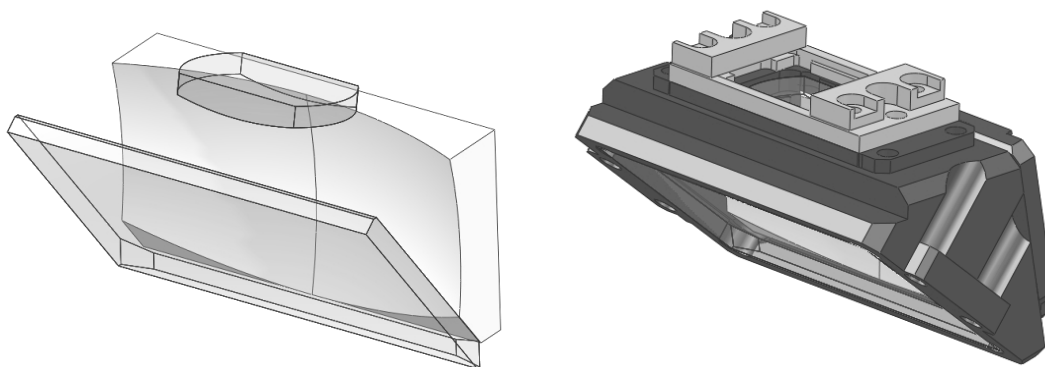


Рисунок 43 – Объемная модель окуляра прицела



Рисунок 44 – Внешний вид окуляра прицела

Недостатком схемы является низкий коэффициент светопропускания. При работе в иммерсивном режиме (полное отражение света от вогнутого зеркала) свет проходит через светоделительную пластину-зеркало дважды. Поэтому в сторону глаза направляется теоретически не более 25% светового потока. Однако данная величина не оказывает существенного влияния на качество наблюдаемого изображения, так как компенсируется большой яркостью микромонитора. При использовании микромонитора на органических светодиодах с яркостью 600 кд/м^2 в желто-зеленом свете и 400 кд/м^2 в белом свете даже неисправленный по потерям окуляр дает поток $60\text{--}120 \text{ кд/м}^2$ в желто-зеленом свете и $40\text{--}80 \text{ кд/м}^2$ в белом свете. Такая яркость превышает адаптационный порог в 30 кд/м^2 и обеспечивает нормальную разрешающую способность глаза [136].

Окуляр может быть просветлен путем применения поляризационных светоделителей, при этом вдвое увеличится светоотдача окуляра, и одновременно может быть решена задача устранения демаскирующей засветки и повышения контраста за счет устранения света, падающего на окуляр, в том числе от лица наблюдателя [137]. В настоящее время в конструкции окуляра цифрового прицела данный метод улучшения светопропускания не используется, но он может быть применен при модернизации прибора.

Расчет окуляра выполнен в коллективе сотрудников Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» с помощью приложения Zemax [132]. Для микродисплея на органических светодиодах SVGA060 результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Характеристики окуляра

Вынос зрачка (при указанных полях зрения)	28°×20° (диаг. 34,4°)	от 21 мм до 32 мм
	22°×16,6° (диаг. 27,5°)	45 мм
	18,7°×14° (диаг. 23,3°)	60 мм
Разрешение		2 угловые минуты
Кривизна поля		0,16–0,48 дптр
Астигматизм		0,32–0,5 дптр;
Дисторсия		< 2 %
Фокусное расстояние		25 мм
Продольный размер		≤ 25 мм

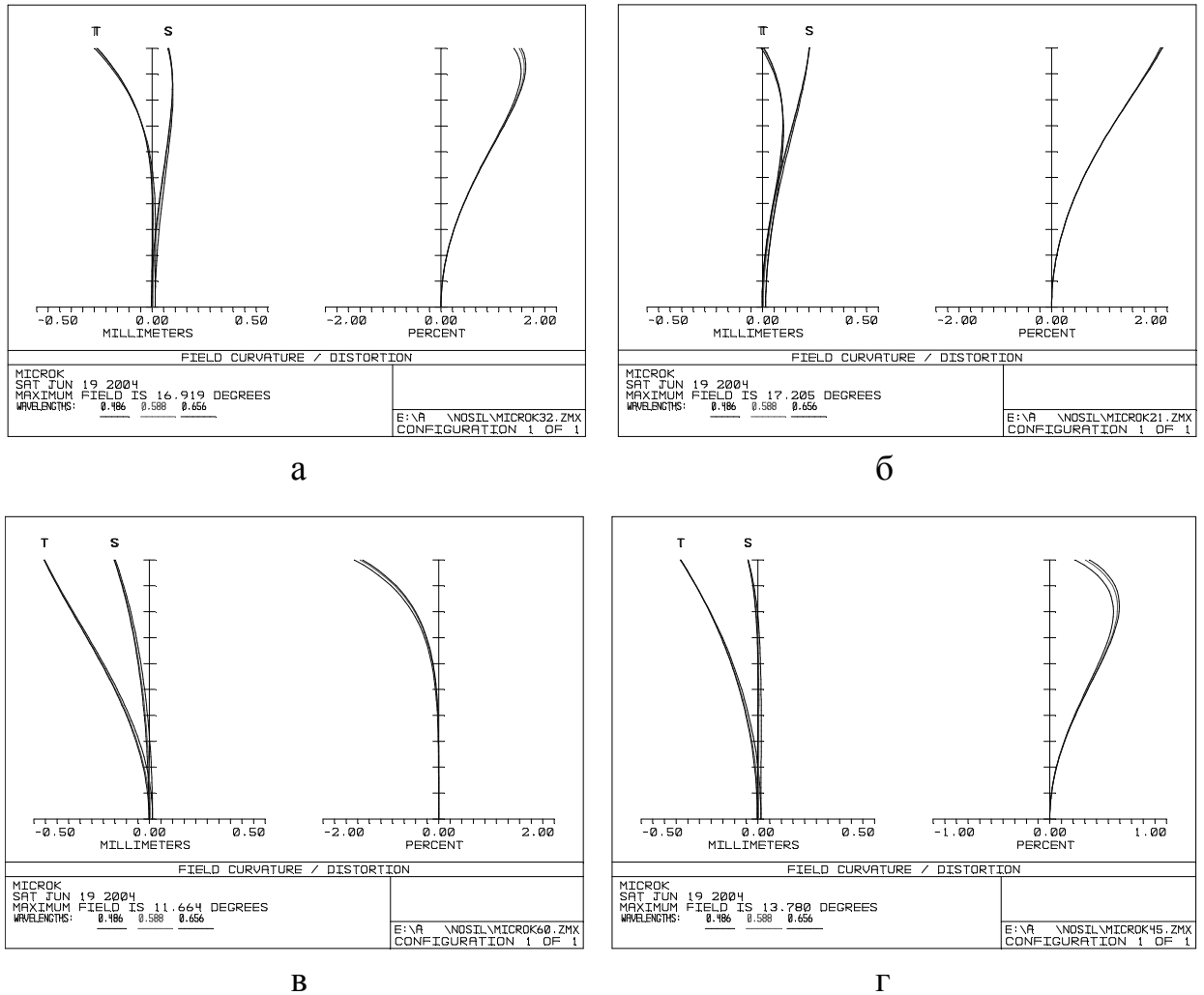


Рисунок 45 – Графики кривизны и дисторсии изображения

а) $R = 21$ мм; б) $R = 32$ мм; в) $R = 45$ мм; г) $R = 60$ мм

На рисунке 45 показаны полевые aberrации, рассчитанные для белого света при разных выносах зрачка. Следует отметить, что окуляр имеет малые хроматические aberrации, кривые для трех основных цветов практически совпадают. При увеличении выноса зрачка кривизна и дисторсия изображений меняют знак. При выносе зрачка от 21 до 45 мм кривизна поля лежит в пределах разрешения аккомодации глаза 0,25–0,3 дптр. При увеличении выноса до 60 мм кривизна возрастает до 0,48 дптр. Дисторсия по модулю во всех случаях не превышает 2%. Астигматизм окуляра недоисправлен, интервал Штурма или астигматическая разность меняется от 0,32 до 0,48 дптр. Однако в окулярах влияние астигматизма сказывается не так сильно, поскольку глаз фокусируется на максимум энергии, расположенный посередине интервала Штурма [136].

2.9 Выводы по результатам второго раздела

1. Разработаны и теоретически исследованы схемы построения оптико-электронного визирного канала цифрового прицела для стрелкового оружия.

2. Предложена схема построения процессора изображений на принципах реконфигурируемой высокопроизводительной системы. На его базе реализованы аппаратно-программные модули, осуществляющие анализ и обработку изображений сцены автоматически без вмешательства оператора: при смене наблюдаемой сцены, в т.ч. при резкой смене контрастов, процессор изображений автоматически адаптируется к новым условиям наблюдения. Положительный эффект заключается в том, что прибор может применяться в быстроменяющихся условиях фоновой обстановки, и при этом ручная настройка и калибровка прибора не требуются.

3. Разработана схема управления питанием прибора, которая позволяет в зимних условиях использовать дополнительный внешний источник питания, подключаемый к включенному прибору без риска повреждения как прибора, так и источника. Дополнительных нагрузок по энергопотреблению схема не оказывает. Включение и выключения прибора осуществляется одной кнопкой, при этом в выключенном состоянии потребления энергии не происходит.

4. Определено, что при выборе фотоприемного устройства по характеристике «разрешение изображения» не следует ограничиваться разрешением микромонитора. Более целесообразным является выбор фотоприемника с избыточным на первый взгляд разрешением, дающий возможность реализации метода ввода поправок с неподвижной относительно центра поля зрения прицельной шкалой, и обеспечивающий нахождение прицельной марки по центру поля зрения.

5. Предложено использование в составе прибора объектива класса суперапохромат, с хроматизмом положения, исправленным для четырех длин волн, и высоким относительным отверстием. Объектив реализует спектральный широкий диапазон фотоприемника (от 0,4 до 0,9 мкм), что увеличивает

чувствительность всей системы за счет возможности наблюдения во всем диапазоне. Отсутствие необходимости перефокусировки объектива положительно сказывается на стабильности линии прицеливания прибора и на его герметичности за счет исключения из конструкции подвижных элементов.

6. Разработана конструкция окуляра, построенного по принципу ретинального дисплея, позволяющего оператору наблюдать в прибор длительное время без переутомления или напряжения мышц глаза.

3 СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ПРИЦЕЛОВ ДЛЯ СТРЕЛКОВОГО ОРУЖИЯ

В разделе рассматриваются способы повышения эффективности применения цифрового прицела путем улучшения его эргономики и путем реализации новых функций. Предложены способы увеличения кучности стрельбы и уменьшения времени, необходимого на прицеливание. Предложена конструкция органов управления, упрощающая взаимодействие стрелка с прибором.

3.1 Наблюдение малоразмерных объектов

Для удобства наблюдения и прицеливания в условиях, когда в большом поле зрения необходимость отсутствует, в приборе реализована возможность электронного масштабирования изображения. Традиционно электронное увеличение в приборах применяется для того чтобы «растянуть» получаемое с фотоприемной матрицы изображение или его фрагмент на микромонитор, обладающий большим, по сравнению с матрицей разрешением. Однако даже если фотоприемник имеет избыточное по сравнению с дисплеем разрешение [77], как в нашем случае, в электронном масштабировании может возникнуть необходимость для увеличения точности прицеливания по малоразмерным объектам.

Обычно для экономии вычислительных ресурсов прибора и из соображений простоты описания алгоритма на языках программирования аппаратуры для реализации электронного увеличения применяется алгоритм дублирования пикселей изображения. Такой способ увеличения изображения имеет два недостатка. Первый недостаток заключается в том, что увеличенные изображения наблюдаемых объектов оказываются сильно пикселизованными, а диагональные границы наблюдаемых объектов оказываются ступенчатыми или зубчатыми. Второй недостаток заключается в том, что при наблюдении малоразмерных объектов, исходное изображение которых занимает не более 10 пикселей в ширину или высоту, при наведении на них прицельного знака или в случае их

самостоятельного движения по сцене, происходит изменение формы этих объектов, а их контуры начинают мерцать [138].

Мерцание контуров малоразмерных объектов в момент движения обусловлено постоянно меняющейся формой их изображений. В свою очередь причина изменения формы объектов заключается в том, что интенсивность яркости каждого пикселя изображения зависит от соотношения площадей ярких и темных частей объектов, которые на этот пиксель попадают. В качестве примера на рисунке 46 продемонстрировано формирование двух разных пикселизованных изображений одного и того же объекта в зависимости от расположения относительно пикселей фотоприемника. Для упрощения показано формирование изображения однотонного объекта. Формы реальных объектов, изображения которых состоят из полутонов, при пикселизации оказываются еще более зависимыми от взаимного расположения изображений объектов и пикселей. Кроме того, на рисунке 46 показано изменение формы при смещении по горизонтали. При смещении по вертикали или при одновременном смещении по вертикали и горизонтали происходят аналогичные эффекты.

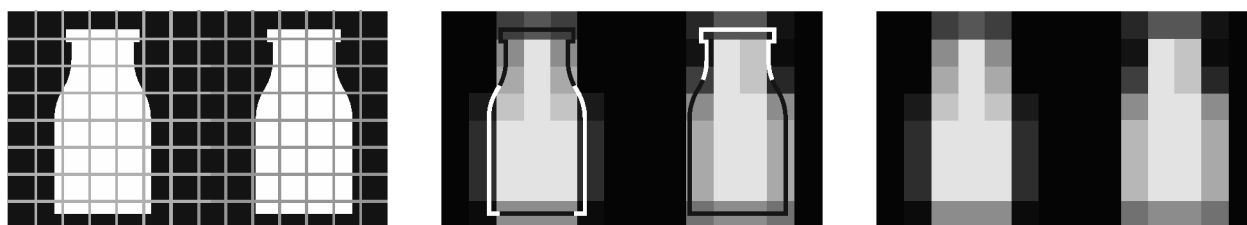


Рисунок 46 – Изменение формы малоразмерного объекта в зависимости от расположения его изображения на матрице фотоприемника

При наблюдении увеличенного фрагмента изображения один реальный пиксель изображения занимает на дисплее прибора четыре, девять, шестнадцать и т.д. пикселей в зависимости от кратности электронного увеличения. Прицеливание же осуществляется с точностью одного дисплея, то есть фактически осуществляется субпиксельное позиционирование прицельного знака на изображении объекта. При использовании реальных приборов с функцией электронного увеличения, реализованной методом дублирования пикселей, не редко возникают случаи, когда прицельный знак наводится на некоторый пиксель

изображения, занимающий за счет увеличения изображения несколько пикселей на дисплее прибора, и в этот момент времени пиксель «исчезает». В частности, подобный эффект наблюдался при испытаниях цифрового прицела.

Избежать проявления указанных эффектов помогает иной способ реализации электронного увеличения изображения. Вместо того, чтобы дублировать исходные пиксели, следует дополнять изображение, помещая между исходными пикселями пиксели со значениями яркости равными некоторым средним значениям яркостей соседних исходных пикселей [139]. Подобная процедура хорошо известна в компьютерной графике и называется интерполяцией изображения [140]. В качестве способа расчета значений промежуточных пикселей был выбран метод билинейной интерполяции, описанный в [141, 142]. Метод был выбран как наиболее простой для реализации программным способом в уже существующем аппаратно-программном комплексе обработки изображений. Помимо него рассматривался метод бикубической интерполяции, также описанный в [140], но на этапе экспериментальной проверки метода билинейной интерполяции последний показал, что полностью удовлетворяет исходным требованиям – позволяет устранить мерцание контуров малоразмерных объектов и визуально улучшает их изображения. По той причине, что метод билинейной интерполяции оказался достаточным для решения поставленной задачи, метод бикубической интерполяции не реализовывался как более сложный с точки зрения написания программного кода для его реализации.

Алгоритм расчета значений методом билинейной интерполяции сводится к следующим действиям. Сначала рассчитываются промежуточные значения крайних пикселей, располагающихся в первом и последнем столбцах будущего увеличенного фрагмента изображения, расположенного между четырех исходных пикселей:

$$R_{X,1} \approx \frac{N-X}{N} Q_{1,1} + \frac{X}{N} Q_{N,1} \quad (19)$$

$$R_{X,N} \approx \frac{N-X}{N} Q_{1,N} + \frac{X}{N} Q_{N,N} \quad (20)$$

Затем производится линейная интерполяция вдоль оси ординат между точками $Q_{1,1}$, $Q_{1,N}$, между точками $Q_{N,1}$, $Q_{N,N}$ и между вспомогательными точками $R_{X,1}$, $R_{X,N}$:

$$R_{1,Y} \approx \frac{N-Y}{N} Q_{1,1} + \frac{Y}{N} Q_{1,N} \quad (21)$$

$$R_{N,Y} \approx \frac{N-Y}{N} Q_{N,1} + \frac{Y}{N} Q_{N,N} \quad (22)$$

$$R_{X,Y} \approx \frac{N-Y}{N} R_{X,1} + \frac{Y}{N} R_{X,N} \quad (23)$$

В формулах (21–23) как и в формулах (19, 20) в качестве размера массива точек изображения используется N одинаковое и для интерполяции по оси абсцисс, и для интерполяции по оси ординат. Связано это с тем, что изображение по обоим осям должно быть увеличено с одинаковым масштабом. Результат билинейной интерполяции не зависит от порядка шагов. Возможен обратный порядок, когда сначала интерполируются значения между известными точками вдоль оси ординат и затем, получив необходимые вспомогательных значения, продолжается интерполирование между ними вдоль оси абсцисс. Результат будет тот же. Процедура интерполяции продолжается для каждого набора из смежных пар пикселей, находящихся в пределах увеличиваемого поля изображения.

Экспериментальная проверка на макете цифрового прицела показала, что при использовании интерполяции увеличенного изображения мерцание контуров малоразмерных объектов при их движении в поле зрения не наблюдается. Благодаря этому время наведения прицельного знака уменьшается. За счет возможности прицеливания с субпиксельной точностью также повышается точность и кучность стрельбы. Аналогичный результат был получен при проведении полигонных испытаний тепловизионного прицела.

Пример электронного увеличения изображения приведен на рисунке 47.



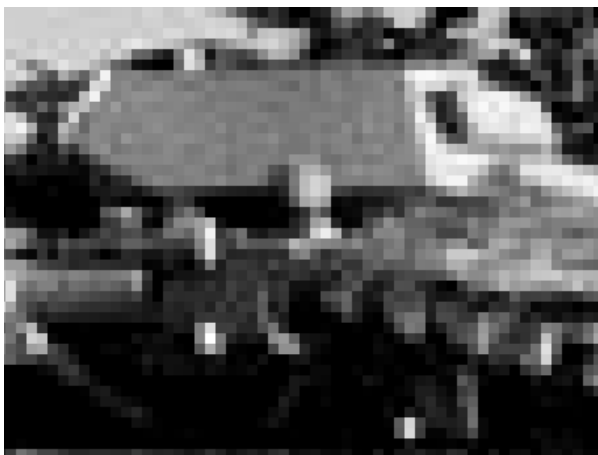
а



б



в



г



д

Рисунок 47 – Электронное увеличение изображения. а) исходное изображение; б) результат увеличения в три раза путем дублирования элементов; в) результат увеличения в три раза с применением билинейной интерполяции; г, д) результаты увеличения в семь раз

Также в процессе экспериментальной проверки выявилось две особенности применения электронного увеличения. Первая особенность заключается в том, что для повышения кучности стрельбы кратность увеличения должна быть нечетной. Связанно это с тем, что при нечетном увеличении центром «увеличенного пикселя» изображения является пиксель дисплея, а при четном увеличении центром является граница между пикселями, поэтому прицеливание осуществляется не в центр, а в смещенную точку. Пример показан на рисунке 48 –

прицеливание осуществляется в исходную точку «Д», и в случае четного увеличения реальный центр увеличиваемого пикселя «Д» приходится между пикселями увеличенного изображения, но при отображении на дисплее прибора прицельной шкалы, точка прицеливания совпадет с одним из углов увеличенного пикселя, что является некорректным.

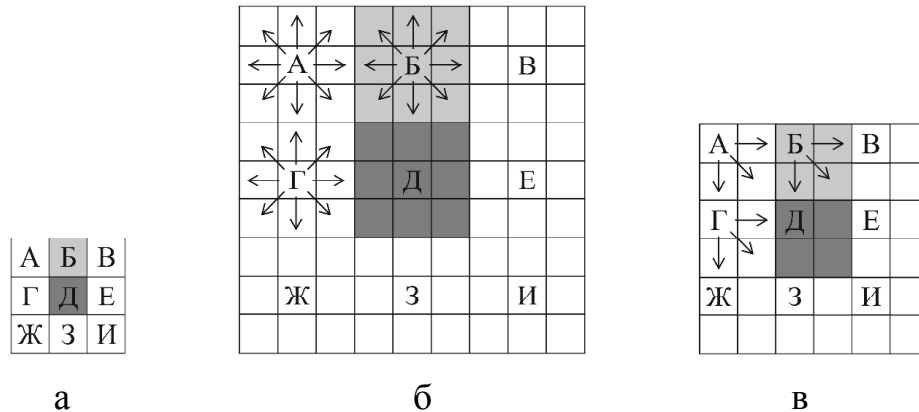


Рисунок 48 – Масштабирование изображения «от центра пикселя». а) исходное изображение; б) трехкратное увеличение; в) увеличение изображения в два раза

Вторая особенность заключается в том, что для увеличения необходимо выбирать такой фрагмент изображения, чтобы прицельный знак находился в его центре. В противном случае при относительно большом увеличении прицельный знак оказывается вне поля зрения оператора.

3.2 Органы управления для ввода поправок

Для осуществления пристрелки прицела, а также для обеспечения ввода поправок на условия стрельбы [143, 144] в конструкции прибора должно быть предусмотрено смещение прицельной сетки в поле зрения прибора по вертикали и горизонтали, и, соответственно, на корпусе прицела необходимы органы управления, осуществляющие это смещение.

В конструкцию классических оптических прицелов для стрелового оружия обычно входят два маховичка, используемые для смещения прицельной сетки. На рисунке 49 изображены маховички прицела ПСО-1 [78].



Рисунок 49 – Внешний вид маховичков ввода поправок прицела ПСО-1

Конструкция цифрового прицела не предполагает наличия механизмов смещения прицельной сетки, так как изображение прицельного знака и шкалы в таких приборах строится электронно непосредственно на дисплее прибора и не может быть смещено механическим способом. Но прицельный знак в приборе может быть смещен относительно изображения сцены программно, на заданную величину, управление которой может осуществляться с помощью кнопок, с помощью джойстика или с помощью колеса прокрутки. Колесо прокрутки может иметь форму барабанчика по аналогии с маховичками оптического прицела, либо может быть углублено внутрь корпуса прицела по аналогии с колесом прокрутки мыши персонального компьютера.

При разработке и выборе механизма ввода поправок были приняты во внимание несколько требований, которым он должен удовлетворять – это простота использования, наличие защиты от самосрабатывания, герметичность конструкции, относительная прочность и устойчивость к ударам, а также тактильность. Механизм должен быть тактильным, чтобы стрелок, пользуясь данным механизмом, ощущал обратную связь с ним. При этом не должно иметь значения, вводится поправка голой рукой, или в перчатке.

Джойстик в качестве управляющего органа прицела не может быть применен, так как он не защищен от самосрабатывания – случайное касание им окружающих предметов или одежды может привести к нежелательным изменениям параметров прибора. Колесо прокрутки аналогичное «мышинному»

также обладает недостатками, среди которых расход внутреннего объема прибора и проблема обеспечения герметичности конструкции.

Большинство современных электронных прицелов в качестве органов управления имеют кнопки. На рисунке 50 в качестве примера изображены панели прицелов AN/PAS-13D и ATN ThOR-320. Недостатками использования кнопок является необходимость использования двух кнопок для управления одним параметром – «увеличить» и «уменьшить». Для уменьшения занимаемой органами управления прибора площади поверхности несколько параметров могут управляться тремя кнопками «увеличить», «уменьшить» и «выбор», а не парой кнопок на каждый параметр, но такой подход может быть применен только для управления параметрами, не требующими оперативности, и поэтому для управления вводом поправок не желателен. Для обеспечения тактильности кнопки должны иметь достаточную площадь, для того чтобы их можно было нажимать не только голыми пальцами, но также в зимних перчатках. При этом должна исключаться возможность случайного одновременного нажатия нескольких кнопок пальцем зимней перчатки. Также кнопки должны отличаться друг от друга на ощупь, чтобы имелась возможность вводить поправки, не отрывая взгляд от окуляра прибора.

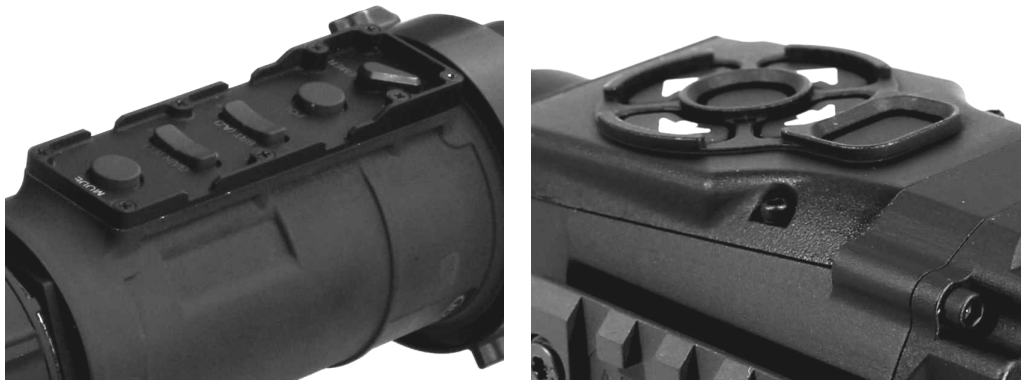


Рисунок 50 – Внешний вид органов управления прицелов AN/PAS-13D (слева) и ATN ThOR-320 (справа). Видны характерные борта вокруг кнопок, препятствующие произвольному нажатию

По сравнению с кнопками устройства вводов поправок в форме барабанчиков имеют несколько преимуществ. Барабанчики защищены от случайного срабатывания наличием устойчивых положений – для того чтобы

повернуть маховичок необходимо приложить к нему некоторое усилие. Барабанчик проще в использовании, чем кнопки, более тактильный, и ввод поправок с его помощью получается более оперативным, чем ввод с помощью кнопок. Кроме того, по отзывам многих стрелков, ввод поправок с помощью барабанчика является более предпочтительным по причине привычки его использования на классических оптических прицелах [50].

Существует несколько способов измерения положения барабанчика: в конструкции механизма поправок может быть использован многопозиционный переключатель, переменный резистор, микропереключатель, срабатывающий в момент поворота маховичка, оптический энкодер и магнитный энкодер. Переключатели, переменный резистор и оптический энкодер менее предпочтительны, так как при их использовании возникает необходимость дополнительного усложнения конструкции механизма ввода поправок для обеспечения его герметичности за счет ввода в конструкцию сальников и прокладок. Применение же магнитного энкодера, представляющего собой отдельные магнит и датчик, расположенные по разные стороны стенки корпуса прибора, обеспечивает герметичность прибора, и при этом экономит занимаемый конструкцией объем [116].

Изображение механизма ввода поправок на базе магнитного энкодера представлено на рисунке 51.

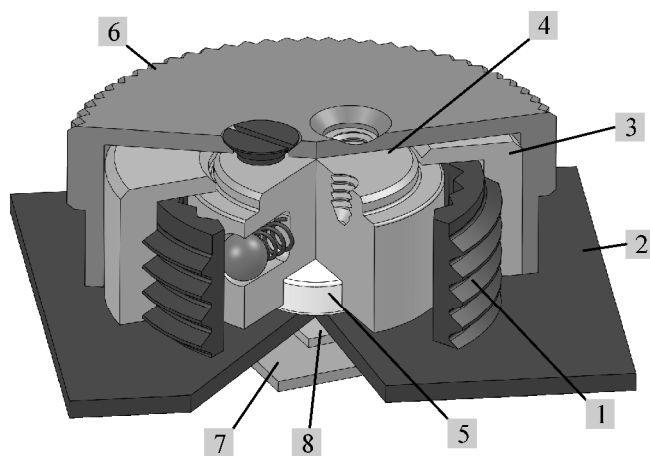


Рисунок 51 – Изображение механизма ввода поправок в разрезе

Корпус механизма ввода поправок состоит из нескольких деталей. Основание (1) образуется непосредственно из стенки корпуса прицела (2). Внутренняя поверхность основания ребристая, представляет собой многолучевую звезду. К основанию резьбовым соединением крепится крышка (3), предотвращающая выпадение барабанчика (4). От самопроизвольного выкручивания крышка может быть зафиксирована с помощью шпильки. В боковой поверхности барабанчика имеется отверстие, в которое помещается шарик с пружиной. Шарик и ребристая поверхность основания играют роль стопора, фиксирующего положение барабанчика в заданном положении, и обеспечивающего дискретность ввода поправок. В нижней части барабанчика предусмотрена полость, в которую помещается постоянный магнит в форме шайбы (5), прикрепляемый с помощью клея. Сверху к барабанчику тремя винтами крепится маховичок (6), имеющий для удобства вращения ребристую внешнюю поверхность. Маховичок одновременно является деталью, защищающей механизм ввода поправок от попадания внутрь пыли.

С обратной стороны стенки прицела, непосредственно под магнитом, закрепленным на барабанчике, находится плата (7) с расположенным на ней датчиком (8) магнитного поля. Платы каждого механизма ввода поправок с помощью кабелей соединяются с основной платой прицела.

За счет того что подвижные детали механизма ввода поправок никак не связаны с деталями, находящимися внутри прицела, обеспечивается полная герметичность прибора. В то же время алюминиевый корпус прицела не препятствует прохождению через его стенки силовых линий поля магнита, по направлению которых может быть определено положение маховичка.

Следует отметить, что в качестве источника магнитного поля может быть использован только постоянный магнит с диаметральной направленностью поля (рисунок 52). Магниты с аксиальным направлением поля для измерения положения маховичка не могут быть применены, так как вращение их вокруг своей оси не приводит к изменению поля вокруг датчика, расположенного под магнитом.

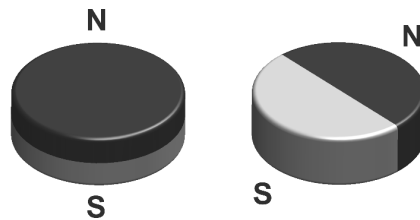


Рисунок 52 – Магниты с аксиальным (слева) и диаметральным (справа) направлениями поля

На этапе экспериментов было изготовлено несколько вариантов механизмов ввода поправок, отличавшихся друг от друга диаметром маховичка и шагом ребер внутренней поверхности основания.

Варианты с диаметром маховичка менее 20 мм оказались неудобны тем, что им для обеспечения тактильности необходим больший шаг ребер внутренней поверхности, т.е. дискретность вращения такого механизма составляет около десяти позиций на один оборот. При большем количестве позиций и, соответственно, меньшем шаге ребер, вращая маховичок, стрелок не ощущает его «щелчки», таким образом, отсутствует обратная связь между маховичком и стрелком. В то же время, небольшое (около 10) количество позиций маховичка вынуждает при вводе поправки повернуть маховичок более чем на пол-оборота, что двумя пальцами без перехватывания сделать невозможно, а на перехватывание маховичка стрелок тратит дополнительное время.

Экспериментально было установлено, что для комфортного ввода поправки маховичок должен обладать дискретностью около 20 позиций на один оборот. Варианты с большим, чем 30 мм диаметром маховичка могут обладать более 40 позициями на один оборот, что является избыточным, и в то же время увеличение диаметра маховичка приводит к увеличению массы механизма ввода поправок и к увеличению занимаемой им площади поверхности корпуса прицела [116].

Таким образом, оптимальным является диаметр маховичка от 20 до 30 мм. Для использования в экспериментальном цифровом прицеле было принято решение использовать маховичок диаметром 24 мм. Шаг ребер внутренней поверхности основания корпуса механизма ввода поправок был выбран 15° , таким образом дискретность вращения маховичка составила 24 позиции на один оборот.

Такой шаг достаточен для ввода необходимой боковой или вертикальной поправки, и при этом обеспечивается обратная связь маховичка со стрелком за счет ощущения «щелчков» при повороте маховичка [116].

В качестве энкодера в составе прибора применен датчик магнитного поля AS5050 производства AustriaMicroSystems [145]. Датчик представляет собой законченное устройство, включающее в себя все необходимые для измерения направления магнитного поля модули: четыре датчика Холла, непосредственно участвующие в измерении напряженности поля, усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), прецизионный малошумящий источник питания датчиков Холла, являющийся также источником опорного напряжения АЦП, аппаратный SPI-модуль, осуществляющий связь микросхемы с внешним микроконтроллером, и модуль управления, осуществляющий анализ полученных с АЦП данных, выдачу их по запросу через SPI-модуль и генерацию прерываний. Модуль управления имеет несколько управляющих регистров, изменяя значения которых можно изменять режимы работы датчика, несколько статусных регистров, по значениям которых можно судить о текущем режиме работы микросхемы, и регистр, предназначенный для хранения полученных с АЦП данных о направлении внешнего магнитного поля.

В [146] для работы с датчиками серии AS5000 рекомендованы постоянные магниты неодим-железо-бор (NdFeB) или самарий-кобальт (SmCo), имеющие форму шайбы высотой 2,5 мм и диаметром 6 мм, с диаметральным направлением магнитного поля.

Магниты SmCo являются более устойчивыми к высоким температурам (от 200 °C), но при этом являются более дорогими по сравнению с магнитами NdFeB. Так как температурный диапазон эксплуатации прибора не превышает 50 °C магниты NdFeB являются более предпочтительными.

Рекомендованный диаметр шайбы 6 мм обусловлен тем, что такой размер является компромиссным для двух взаимоисключающих параметров системы магнит-датчик. При увеличении диаметра магнита ослабевает получаемый аналоговой частью датчика дифференциальный сигнал и уменьшается его

отношение сигнал/шум, таким образом, падает точность измерения. При уменьшении диаметра магнита уменьшается линейность измерений направления поля датчиком, и одновременно увеличивается влияние смещения магнита относительно центра датчика. В [146] приводятся графики, из которых следует, что оптимальным является диаметр магнита 6 мм.

Также в [146] приводится график зависимости амплитуды получаемого аналоговой частью датчика сигнала от толщины магнита. Для шайбы диаметром 6 мм оптимальным является диапазон толщины от 2,5 до 8 мм. Так как из-за конструктивных особенностей механизма ввода поправок (таких как наличие крепежных винтов и отдельного отверстия в барабанчике под стопорный шарик с пружиной) высота магнита должна быть как можно меньшей, была выбрана толщина магнита 2,5 мм.

Расстояние от магнита до датчика выбирается из условий, что напряженность поля вокруг элементов Холла датчика должна находиться в диапазоне 45–70 мТл. Например, для неодимовых магнитов диаметром 6 мм и толщиной 2,5 мм марок N35, N35H, N35HS оптимальным является расстояние от 1 мм до 2 мм, для магнитов марок N43 – от 2 мм до 3 мм. Толщина стенки алюминиевого корпуса цифрового прицела находится в диапазоне от 1 до 1,5 мм. За счет того, что барабанчик механизма ввода поправок прижимается к маховичку и тем самым «повисает» над стенкой корпуса прибора на расстоянии от 0 до 0,5 мм, суммарное расстояние от магнита до датчика находится в диапазоне от 1,5 до 2 мм. Таким образом, в качестве магнита оптимально использовать шайбу марки N35 или N35H. В составе разработанного механизма ввода поправок используется NdFeB магнит марки BMN-35H производства Vometec, имеющий рекомендованные размеры 6×2,5 мм. Магнит имеет никелевое покрытие для защиты от коррозии [147].

Взаимное подключение модулей датчика между собой и к внешнему микроконтроллеру схематично изображено на рисунке 53, взятом из документации на микросхему [145]. В цифровом прицеле к одному и тому же микроконтроллеру параллельно по SPI-шине подключаются два датчика – один

сопряжен с механизмом ввода боковых поправок, второй – с механизмом ввода угла прицеливания.

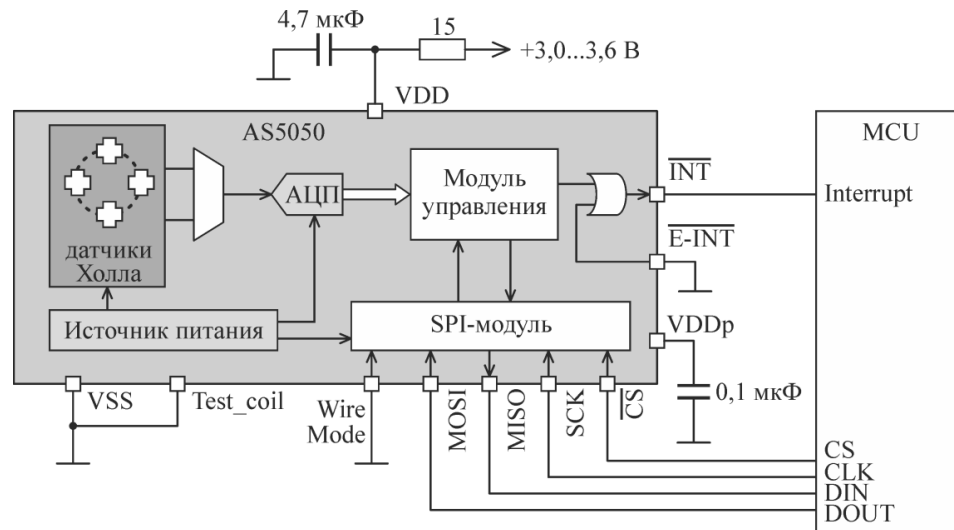


Рисунок 53 – Структурная схема датчика AS5050 с типовым подключением внешнего микроконтроллера

В качестве внешнего (по отношению к датчикам магнитного поля) микроконтроллера в прицеле используется уже имеющийся микроконтроллер, свободные выходы которого были использованы в качестве SPI-шины. Протокол обмена данными между микроконтроллером и датчиками описан в [145].

Маховичок имеет 24 устойчивых положения с шагом 15° . В начальный момент времени при инициализации микроконтроллера происходит чтение значения направления магнитного поля датчика. Полученное абсолютное значение направления поля X принимается за середину диапазона для сохраненного в памяти до выключения прибора положения маховичка N . За нижнюю границу диапазона принимается значение $X - 7.5^\circ$, а за верхнюю границу диапазона принимается значение $X + 7.5^\circ$. Полученное значение выбирается за середину диапазона для того чтобы за счет погрешности измерения направления магнитного поля и за счет люфта маховичка, разброс дальнейших измерений направления поля не превышал границы диапазона, и, соответственно, не происходило ложных срабатываний функции, определяющей поворот маховичка из одного положения в другое. Далее программно составляется таблица, определяющая диапазон значений положения поля $T[i]$, соответствующих положению маховичка $i = 0$, положению $i = 1$, и т.д. до положения $i = 23$.

Середины диапазонов с некоторой погрешностью значений соответствуют устойчивым положениям маховичка.

Следует отметить, что получаемое с датчика значение направления магнитного поля, а также диапазоны значений для таблицы выражаются не в градусах, а в условных единицах. Так как значение направления поля, получаемое датчиком 10-разрядное, значению 0° соответствует число $0x000$, значению 360° соответствует число $0x3FF$ (в 16-разрядной системе исчисления), а диапазоны значений имеют вид $X \pm 0x015$, где $0x015$ соответствует 7.5° . Для того, чтобы избежать необходимости работы с отрицательными числам к каждому значению в таблице, а также к каждому значению, получаемому с датчика прибавляется значение $0x3FF$.

После составления таблицы диапазонов значений запускается бесконечный цикл, в котором периодически происходит опрос датчика и определение по таблице значения положения маховичка. В цикле происходит поочередное сравнение полученного с датчика значения направления поля с элементами таблицы. Кроме того, проверяется, не превышает ли данное значение максимально возможное, и не является ли оно меньше минимального значения таблицы – в этих случаях к значению добавляется необходимое смещение, равное по модулю $0x3FF$. В случае изменения значения положения, осуществляется вызов соответствующей функции F , сообщающей модулю формирования изображения прицельной шкалы (чаще всего реализованному в отдельной микросхеме) величину смещения. Новое значение положения маховичка при этом сохраняется в энергонезависимую FRAM-память прибора.

Анализ положения маховичка механизма ввода поправок осуществляется по алгоритму схематично изображенному на рисунке 54.

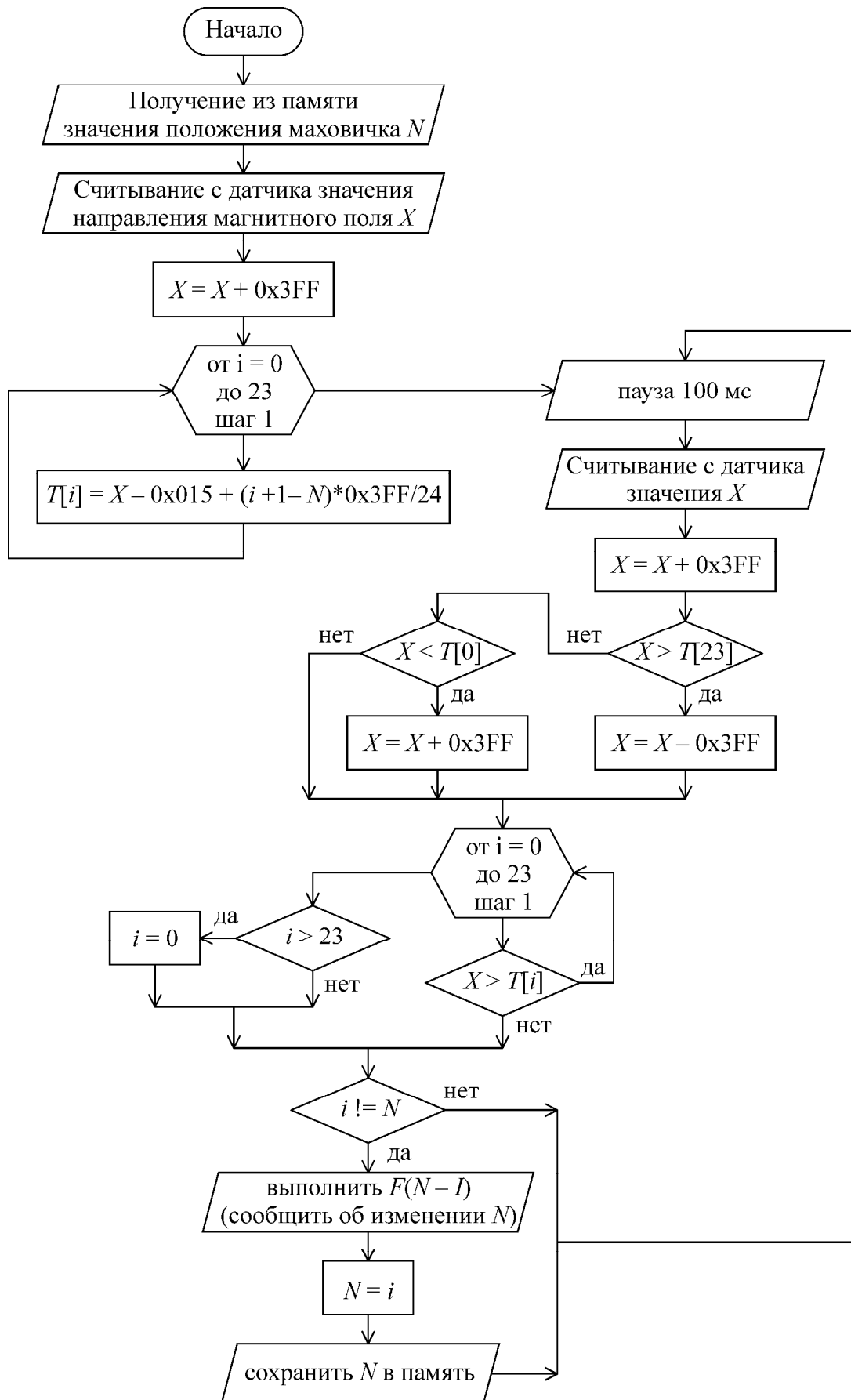


Рисунок 54 – Блок-схема алгоритма, определения положения маховичка механизма ввода поправок

Период опроса обоих датчиков магнитного поля составляет около 100–200 мс, т.е. от 5 до 10 раз за секунду. Такая частота выбрана из соображений, что относительно частое обращение к датчикам ведет к увеличению энергопотребления системы без увеличения производительности – для относительно быстрой реакции прибора на поворот маховичка вполне достаточно частоты опроса датчиков порядка 5–10 раз в секунду. При этом суммарное время опроса каждого датчика [145] и время выполнения действий в соответствии с описанным алгоритмом над полученными с датчиков данными типовым микроконтроллером составляет не более 100 мкс.

3.3 Индикация наличия сваливания оружия

Одно из правил прицеливания гласит: нельзя сваливать винтовку [148]. Под сваливанием понимают боковой наклон винтовки, т.е. такое положение, когда грибка открытого прицела и шкала боковых поправок оптического прицела располагаются не горизонтально.

Если винтовка держится не точно в вертикальной плоскости, а свалена, т.е. наклонена, например, в правую сторону, то пуля уйдет правее и ниже, а при наклоне (сваливании) в левую сторону попадание будет влево и также ниже [148]. Отклонение пули тем больше, чем больше расстояние до цели и угол сваливания. Так как наклон оружия вызывает отклонение пуль и тем самым снижает меткость стрельбы, при прицеливании рекомендуется постоянно следить, чтобы шкала боковых поправок оптического прицела была строго горизонтальна [149].

В таблице 3 приведены значения отклонений для винтовки СВД при угле сваливания 5° в зависимости от расстояния [149]. При угле сваливания 10° отклонения пуль на тех же расстояниях примерно вдвое большие.

Таблица 3 – Отклонение пули при сваливании винтовки на 5 градусов

Дальность стрельбы, м	Горизонтальное отклонение, см	Вертикальное отклонение, см
100	1,7	0,03
200	2,3	0,13
300	5,7	0,25
400	12,5	0,55
500	19,5	0,77
600	31,4	1,40
700	45,8	1,99
800	66,2	2,89
900	94,1	4,10
1000	176,4	5,51

Обычно у начинающих стрелков угол сваливания не превышает 5–10°, но даже при таких сравнительно небольших углах отклонение пули получается весьма значительным, что видно из таблицы 3.

Рассмотрим причину возникновения данного эффекта. При стрельбе на некоторое расстояние ствол оружия расположен не горизонтально, а с определенным наклоном, значение которого называется углом прицеливания. Наклон необходим для того чтобы компенсировать снижение пули, происходящее в процессе ее полета за счет действия силы тяжести. В прицелах необходимая величина угла устанавливается с помощью специального механизма ввода поправок, благодаря которому прицельный знак смещается в поле зрения прицела вертикально. Также может быть предусмотрено несколько прицельных знаков, предназначенных для стрельбы на различные расстояния. Непосредственно перед выстрелом оружие направляется так, чтобы прицельный знак совместился с предполагаемой точкой попадания. При этом ствол оружия будет направлен не в точку прицеливания, а выше (рисунок 55), и если не учитывать деривацию и наличие бокового ветра, то точка направления ствола будет находиться строго над точкой прицеливания.

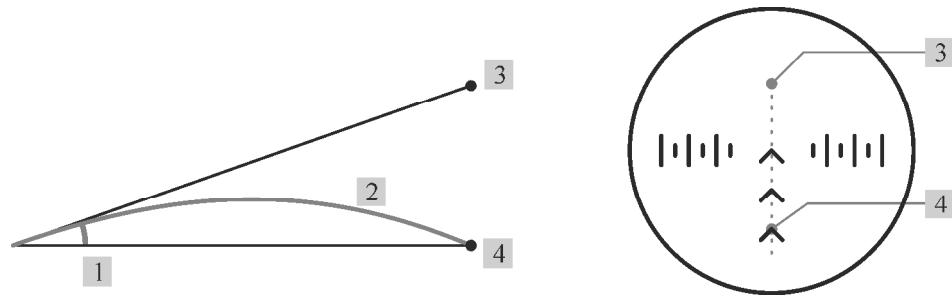


Рисунок 55 – Схематичное изображение прицеливания при стрельбе на заданное расстояние. 1 – угол прицеливания; 2 – траектория полета пули; 3 – точка направления ствола оружия; 4 – точка прицеливания

В случае, когда имеется боковой наклон, точка направления ствола оружия оказывается смещенной относительно точки прицеливания, а, следовательно, смещенной оказывается и точка попадания пули (рисунок 56). Ошибка возникает из-за того, что предполагаемая траектория полета пули находится в плоскости бокового наклона оружия и представляет собой параболу, наклоненную относительно горизонта на угол наклона оружия γ . Но так как сила тяжести, действующая на летящую пулю, при наклоне оружия остается вертикальной, реальная траектория полета пули тоже лежит в вертикальной плоскости.

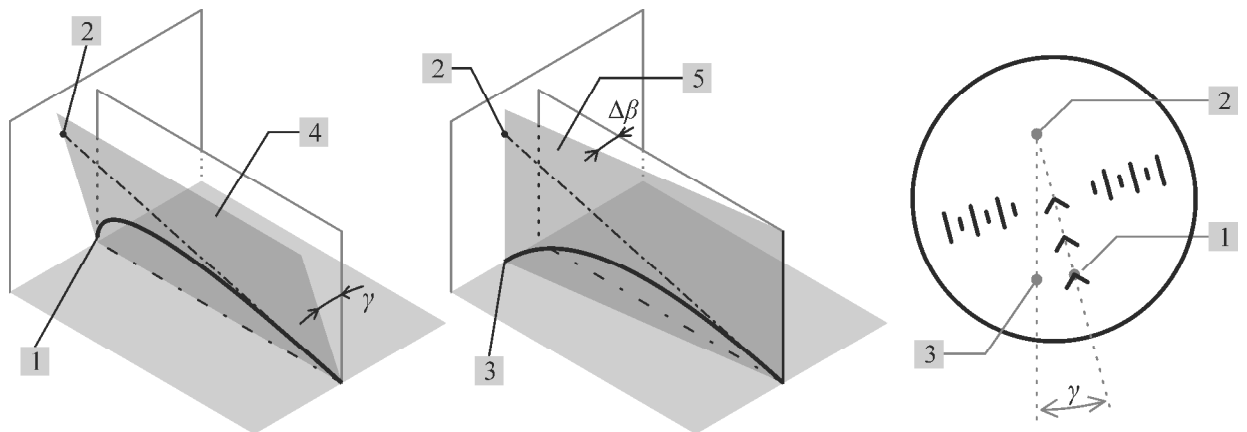


Рисунок 56 – Предполагаемая и реальная траектории полета пули при наличии бокового наклона оружия

1 – точка прицеливания; 2 – точка направления ствола оружия;
3 – точка попадания; 4 – плоскость бокового наклона оружия;
5 – плоскость реальной траектории полета пули

Влияние бокового наклона оружия на точность стрельбы хорошо известно в артиллерии – для учета ошибок прицеливания, возникающих при наклонном к горизонту положении оси цапф орудия, например, при стрельбе с наклонной позиции, существуют соответствующие таблицы поправок [150, 151].

Величины горизонтальной и вертикальной ошибок угла прицеливания в зависимости от бокового угла наклона оружия можно оценить следующим способом. Пусть расстояние до точки направления ствола равно l , а необходимый угол прицеливания при этом равен α , тогда точка направления ствола оружия находится от точки прицеливания на расстоянии:

$$y = l \cdot \sin \alpha \quad (24)$$

При значении угла бокового наклона оружия γ горизонтальное смещение точки направления ствола оружия в сторону наклона равно

$$\Delta x = y \cdot \sin \gamma = l \cdot \sin \alpha \cdot \sin \gamma \quad (25)$$

а вертикальное смещение точки равно

$$\Delta y = y - y \cdot \cos \gamma = l \cdot \sin \alpha \cdot (1 - \cos \gamma) \quad (26)$$

незначительным изменением расстояния l до точки прицеливания пренебрегаем.

Значение синуса фактического угла прицеливания при этом будет равно

$$\sin \alpha^* = \frac{y \cdot \cos \gamma}{l} = \frac{l \cdot \sin \alpha \cdot \cos \gamma}{l} = \sin \alpha \cdot \cos \gamma \quad (27)$$

То есть, фактический угол прицеливания при наличии бокового наклона оружия всегда меньше установленного по прицелу. Вертикальную ошибку угла прицеливания можно вычислить исходя из того что

$$\sin \alpha - \sin \alpha^* = \Delta(\sin \alpha) = \cos \alpha \cdot \Delta \alpha \quad (28)$$

и при этом

$$\sin \alpha - \sin \alpha^* = (1 - \cos \gamma) \cdot \sin \alpha \quad (29)$$

Отсюда

$$\Delta \alpha = \frac{(1 - \cos \gamma) \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha} = (1 - \cos \gamma) \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (30)$$

Ошибка горизонтального угла прицеливания $\Delta \beta$ может быть найдена из соотношения

$$\sin \beta - 0 = \Delta \sin \beta = \cos \beta \cdot \Delta \beta \quad (31)$$

то есть

$$\Delta \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \operatorname{tg} \beta = \frac{\Delta x}{l \cos \alpha} = \frac{l \cdot \sin \alpha \cdot \sin \gamma}{l \cdot \cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \gamma \quad (32)$$

В [150] приводится вывод формул для расчета ошибок $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ иным способом, но результаты совпадают с (30) и (32). Анализ формул (30) и (32) показывает, что вертикальной ошибкой $\Delta\alpha$ угла прицеливания можно пренебречь, так как она при небольших углах бокового наклона оружия мала, и основной ошибкой является ошибка в боковом направлении $\Delta\beta$. Например, при угле прицеливания $\alpha = 0,1^\circ$ и угле сваливания $\gamma = 5^\circ$

$$\Delta\alpha = \operatorname{tg} 0,1^\circ \cdot (1 - \cos 5^\circ) = 0,0017 \cdot 0,0038 = 0,000007 = 0,007 \text{ т.д.} \quad (33)$$

$$\Delta\beta = \operatorname{tg} 0,1^\circ \cdot \sin 5^\circ = 0,0017 \cdot 0,0872 = 0,000153 = 0,15 \text{ т.д.} \quad (34)$$

То есть ошибка в угле прицеливания составляет менее одной двадцатой части ошибки в боковом направлении.

При стрельбе из артиллерийского орудия значение бокового наклона на протяжении всей стрельбы остается фиксированным и поэтому его значение влияет только на точность стрельбы, а не на ее кучность, при этом значение наклона может быть легко измерено с необходимой точностью. Стрелковое оружие не является жестко закрепленным и его наклон может меняться в зависимости от положения рук стрелка. За счет того, что при каждом выстреле имеется новое значение угла наклона, ошибка прицеливания не является постоянной величиной, поэтому она оказывает влияние не только на точность стрельбы, но также и на кучность.

При наличии возможности измерять значение угла сваливания целесообразней не учитывать необходимую поправку с помощью таблицы, а вручную изменять положение оружия таким образом, чтобы его угол бокового наклона был равен нулю. Таким образом, для повышения меткости стрельбы целесообразно определять наличие или отсутствие угла сваливания винтовки и отображать его в прицельной шкале [40].

Современные электронные датчики наклона имеют небольшие размеры и вес. Например, датчик ADXL346 производства Analog Devices, обеспечивающий точность измерения наклона по трем осям не хуже $0,1^\circ$, имеет размеры $3 \times 3 \times 1$ мм и массу 18 мг [152], поэтому добавление датчика в конструкцию цифрового прицела фактически не меняет массогабаритные характеристики прибора.

Испытания экспериментального образца цифрового прицела с датчиком наклона показали, что нет необходимости выводить на дисплей значение угла наклона. Если информацию о наклоне отображать в прицельной шкале, то текст будет закрывать поле зрения. Если текст разместить внизу изображения, то основное поле зрения не будет закрытым, но стрелку время от времени придется переводить взгляд с прицельной марки вниз изображения, чтобы удостовериться в отсутствии наклона.

Лучше всего себя зарекомендовала индикация наличия наклона, и его направление с помощью небольшой вертикальной черты или окружности, находящихся на линии боковых поправок прицельной шкалы (рисунок 57). Если наклон не превышает 1° , то на дисплей информация о наклоне не выводится. Такое отображение наклона не загромождает поле зрения при отсутствии большого наклона и в то же время быстро привлекает внимание, если наклон есть.

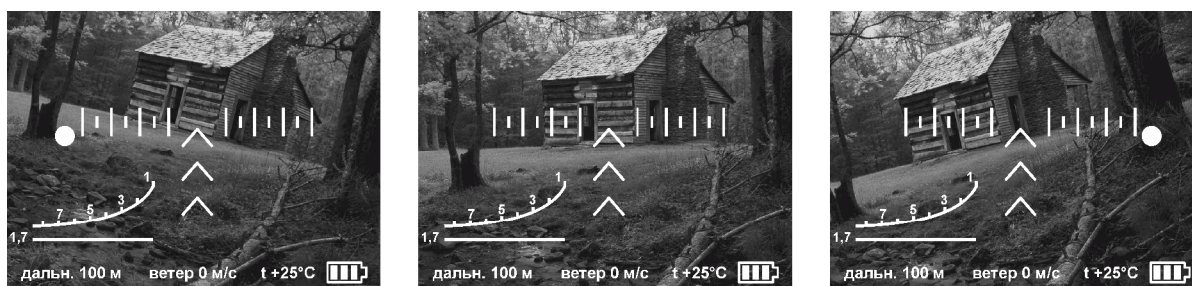


Рисунок 57 – Изображение, (наблюдаемое через цифровой прицел) при наличии бокового наклона (фото слева и справа) и при его отсутствии (фото в центре)

Критическое значение наклона в 1° принято из соображений, что меньший угол наклона практически не влияет на точность попадания, т.к. при этом отклонения пуль не превышают кучности винтовки (значения отклонений в примерно пять раз меньше указанных в таблице 3). Кроме того, даже если винтовка не наклонена, прицел может быть наклонен из-за неточности изготовления посадочного крепления (эту проблему можно решить калибровкой датчика при установке прицела на винтовку).

Для того чтобы окружность индикации наличия наклона не «моргала» при естественном дрожании винтовки в руках при угле наклона близком к 1° и из-за погрешности измерения датчика, в программу, отображающую окружность,

введен гистерезис – индикатор появляется при угле наклона 1° и более, а исчезает при угле наклона менее $0,75^\circ$.

Если принять во внимание тот факт, что у стрелков начального уровня подготовки угол сваливания оружия обычно находится в пределах 5° в обе стороны [149], то в соответствии с формулой (32) отображение наличия угла сваливания $\pm 1^\circ$ позволяет повысить точность стрельбы примерно в 2,5 раза:

$$\frac{\Delta\beta_5}{\Delta\beta_{\pm 1}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \gamma_5}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \gamma_{\pm 1}} = \frac{\sin 5^\circ}{\sin 2^\circ} = \frac{0,087}{0,035} \approx 2,5 \quad (35)$$

Испытания на стрельбище показали, что действительно при использовании датчика наклона в прицеле точность попадания в мишень и кучность стрельбы возрастают. На рисунке 58 представлены результаты отстрелов, выполненных стрелком начального уровня подготовки, при использовании одного и того же цифрового прицела в двух вариантах: с выключенным датчиком наклона (фотография слева) и с включенным датчиком наклона (фотография справа). В каждом случае производилось по 15 выстрелов из охотничьей винтовки Тигр 7,62x54 по грудной мишени.



Рисунок 58 – Результаты отстрела с выключенным датчиком наклона (фотография слева) и с включенным датчиком (фотография справа)

Из фотографий на рисунке видно, что при стрельбе как с включенным, так и с выключенным датчиком наклона, рассеяния пуль по вертикали оказались примерно одинаковые, чуть больше диаметра круга «10». Это связано с тем, что на расстоянии 100 м смещение пуль по вертикали очень мало зависит от угла сваливания винтовки, см. таблицу 3 и формулу (30), и не превышает техническую

кучность винтовки. Рассеяние же по горизонтали с включенным датчиком оказалось примерно в два с половиной раза меньше, чем при стрельбе с отключенным датчиком, что подтверждает расчетные данные. В экспериментах величины рассеяний измерялись методом среднеквадратичных отклонений пробойн от их средней точки попадания (СТП).

3.4 Прицельная сетка и индикация параметров прибора

Основным элементом поля зрения прицела является прицельная марка, предназначенная для наведения оружия на цель. Во многих прицелах помимо марки предусмотрены вспомогательные линии, шкалы, подписи и изображения, называемые прицельной сеткой. Прицельная марка имеет характерную точку, которая при прицеливании совмещается с целью, например: центр перекрестия, вершина угольника, конец вертикального штриха, центр окружности и т.д. Традиционно форма и размеры прицельного знака вызывает наибольшее количество вопросов среди пользователей прицельной техники [153, 154]. Каждый стрелок предъявляет к нему свои индивидуальные требования, зависящие от привычек стрелка, ситуационной обстановки, в которой планируется использовать оружие (охота, спортивные соревнования, в бою), от дальности стрельбы, и идеальной прицельной марки, удовлетворяющей всем требованиям, не существует [155].

На выбор углового размера прицельной марки влияет угловой размер ожидаемой цели. Если видимый размер прицельного знака больше цели, то цель окажется закрытой изображением знака. Если цель слишком велика по сравнению с прицельным знаком, тогда сам знак может теряться на фоне цели [153]. При достаточно большом увеличении, например 25 крат, поле зрения прицела будет иметь угловой размер около одного градуса. Соответственно ростовая фигура, имеющая на дальности 200 метров угловой размер $9' \times 30'$, перекроет центральную часть поля зрения. Темная прицельная марка на таком фоне не имеет достаточного контраста, что затруднит прицеливание. Для обеспечения быстрого

прицеливания прицельную марку необходимо сделать крупнее, например 15 угловых минут, но такая марка полностью закроет изображение ростовой фигуры расположенной на дальности 500 м, угловые размеры которой составят $3,6' \times 12'$. Чем шире диапазон дальностей, на которых ведется стрельба, тем глубже противоречие в размерах прицельного знака. Один из путей решения данного противоречия в оптических прицелах классической конструкции состоит в использовании сеток с тонкими линиями, которые накладываясь на изображение цели, не перекрывают ее. Минимальная толщина линий образующих прицельный знак рассчитывается исходя из разрешающей способности глаза стрелка. Но такое решение неприемлемо в цифровых прицелах, т.к. минимально допустимая толщина линии определяется размером пикселя изображения на дисплее прибора, меньше которого толщина не может быть по определению.

Помимо прицельной марки прицельная сетка может состоять из вспомогательных штрихов, дальномерных шкал, применяемых для измерения угловых размеров наблюдаемых объектов, дополнительных прицельных марок, учитывающих баллистические характеристики комплекса «оружие + патрон». В современных прицелах применяются несколько десятков различных сеток, включающих несколько видов прицельных знаков. В частности в каталоге U.S.Optics представлено 76 типов прицельных сеток [156].

С учетом описанного было принято решения для удовлетворения потребностей пользователей предоставить возможность самостоятельного выбора необходимой прицельной сетки и обеспечить возможность самостоятельного конструирования изображения. В качестве базовых прицельных сеток в макете цифрового прицела реализована сетка псевдо-Mil-Dot (максимально приближенная к Mil-Dot с учетом невозможности изображения идеальных окружностей на дисплее, состоящем из квадратных пикселей), ПСО-образная сетка, состоящая из нескольких прицельных марок в виде пики и вертикальных штрихов, перекрестие, вертикальный штрих и некоторые другие. На рисунке 59 приведены примеры прицельных сеток. Для обеспечения контрастности элементов прицельной сетки на фоне цели пользователю предоставлена

возможность изменения их цветности. Эксперименты показали, что зеленая или красная прицельная марки лучше всего видны на черно-белом изображении сцены. При этом цвет по выбору пользователя может быть любым.

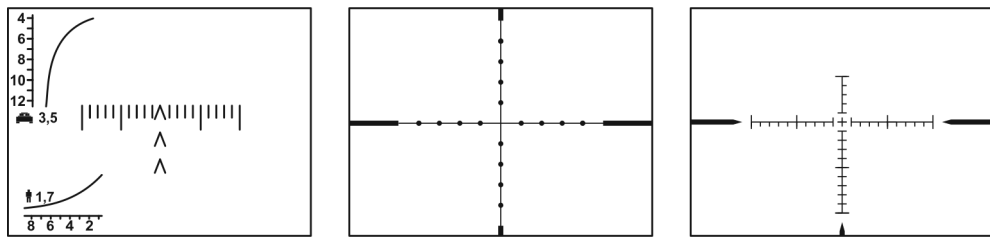


Рисунок 59 – Примеры используемых прицельных сеток

Дополнительно на дисплее прибора отображается одна из нескольких дальномерных шкал в виде улиток, базами для которых являются ростовая фигура человека (выстой 1,7 м), лобовая (ширина 3,5 м) и бортовая (длина 7,5 метров) проекции танка и высота телеграфного столба (6 м). При необходимости шкала может отключаться, чтобы не загромождать изображение.

Интерфейс управления прибором сделан интуитивно понятным и максимально дружелюбным. Информация о текущих параметрах и выбранных режимах работы прибора отображается на дисплее в виде пиктограмм и поясняющего текста, например численные значения боковой и вертикальной поправок, величина яркости/контраста, кратность цифрового увеличения и т.д. Изменение параметров прибора осуществляется при помощи кнопок (помимо вертикальной и горизонтальной поправки, управление которыми осуществляется при помощи описанных ранее барабанчиков-энкодеров). Изменяемый параметр на дисплее прибора выделяется рамкой либо подчеркивается, чтобы пользователь видел, что именно изменится, если нажать кнопку Плюс или Минус. Для упрощения пользовательского интерфейса реализованы длительные нажатия кнопок Плюс-Минус, при которых осуществляется быстрое грубое изменение параметра. Для точного изменения в ту или иную сторону используется кратковременное нажатие кнопок.

3.5 Выверка прицела

Выверка прицела (приведение к нормальному бою), т.е. определение степени согласования оптической оси прицела с осью канала ствола [144], является одним из основных мероприятий по поддержанию комплекса «оружие-прицел» в готовности. Качество выверки прицелов оказывает существенное влияние на результаты стрельбы, поэтому процедура выверки должна быть максимально облегченной задачей для пользователя, но при этом должна происходить без ущерба точности наведения оружия на цель.

Так как рассматриваемый цифровой прицел обладает избыточным разрешением фотоприемника по сравнению с разрешением дисплея, выверка прицельного знака (как и ввод поправок при стрельбе) осуществляется особым способом – прицельная шкала остается неподвижной в центре поля зрения, а изображение наблюдаемой сцены смещается относительно дисплея. Такой способ выверки прибора повышает информативность изображения, за счет того что прицеливание во все время эксплуатации прицела осуществляется по центру поля зрения [77].

Процесс выверки прицела происходит следующим образом. При помощи ствольного коллиматора выверки [157, 158] устанавливается начальное значение смещения прицельного знака относительно исходного местоположения. Через диалоговое окно выверки прибора прицельная марка смещается таким образом, чтобы ее изображение совпало с изображением центра мишени, изображенной на сетке коллиматора и наблюдаемой в прицел. Затем производится группа выстрелов по проверочной мишени, установленной на заданном расстоянии, например в 50 метрах от стрелка или в 100 метрах, или на ином расстоянии. При этом необходимо тщательно и однообразно прицеливаться в соответствующую точку мишени. Поправка на дальность должна соответствовать необходимому табличному значению (или полученному при помощи баллистического калькулятора) для данной дальности. По результатам стрельб определяется средняя точка попадания [143] группы выстрелов на мишени и ее смещение

относительно точки прицеливания по вертикали и горизонтали. Значения смещения по вертикали и горизонтали, а также расстояние до мишени вводятся в соответствующие поля диалогового окна выверки. Программа в прицеле сама рассчитывает необходимые смещения прицельного знака в зависимости от введенных параметров. Затем производится контрольный отстрел по проверочной мишени, и при необходимости новые смещения вводятся в диалоговом окне выверки.

Такой способ выверки позволяет осуществлять пристрелку оружия по одной группе выстрелов, что сокращает время приведения оружия к нормальному бою, экономит патроны и ресурс оружия.

При отсутствии ствольного коллиматора можно произвести несколько выстрелов по проверочной мишени с расстояния 25 м (при установленных поправках, соответствующих данной дальности), затем через диалоговое окно ввести измеренные смещения средней точки попадания группы выстрелов относительно точки прицеливания на данном расстоянии. Эта процедура позволит предварительно установить правильное направление стрельбы, которое само собой потребует уточнения при помощи описанных выше действий, но уже позволит не промахиваться по мишени на расстоянии 100 м. В противном случае для измерения смещений средней точки попадания за мишенью приходилось бы размещать щит достаточной площади, чтобы на нам были видны точки попаданий.

При необходимости в память прибора можно записать индивидуальную точку выверки [158] прицела на данном оружии при использовании данного ствольного коллиматора выверки. Для этого на оружие снова устанавливается ствольный коллиматор выверки таким образом, чтобы в прицел наблюдалась мишень, изображенная на сетке коллиматора. Находясь в диалоговом окне выверки прицела необходимо нажать соответствующую кнопку на корпусе прибора, чтобы появилось перекрестие из двух линий – вертикальной и горизонтальной. При помощи барабанов на корпусе прицела, ранее использовавшихся для смещения прицельного знака относительно изображения

мишени, устанавливается положение перекрестия таким образом, чтобы оно находилось в условной точке прицеливания на мишени (рисунок 60). По нажатию кнопки данное положение перекрестия запоминается. В дальнейшем при выверке прицела на данном оружии и с использованием данного коллиматора достаточно будет через диалоговое окно выверки совместить появившееся перекрестие с изображением точки прицеливания мишени, и все необходимые смещения прицельного знака произведутся прицелом автоматически. В памяти прицела предусмотрено запоминание до 500 индивидуальных точек выверки, которые для простоты могут обозначаться с использованием серийных номеров оружия и коллиматора.

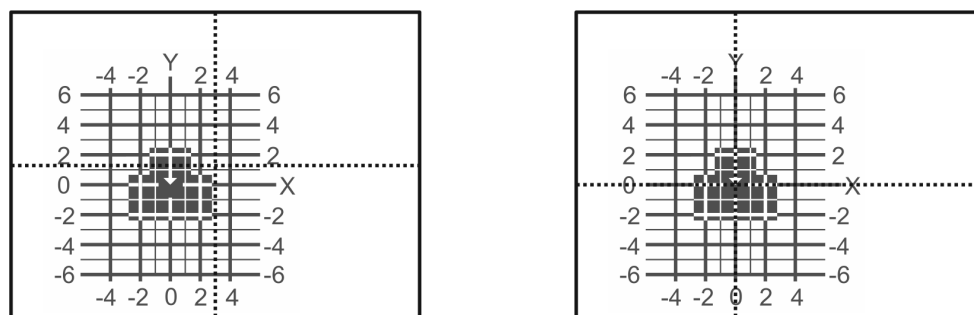


Рисунок 60 – Настройка индивидуальной точки выверки

Использование данной особенности меню выверки прицела позволяет осуществлять бесстрельбовый контроль согласованности прицела с оружием в профилактических мерах для определения возможного сбивания прицела, что может иметь место при его переустановке или неосторожном обращении. Также указанная процедура позволяет осуществлять повторную бесстрельбовую выверку прицела, если он поочередно используется на нескольких винтовках.

В процессе длительной или интенсивной эксплуатации оружия, а иногда и при развитии навыков его удержания, может произойти изменение положения индивидуальной точки выверки [158]. Поэтому при контрольных стрельбах и появлении существенных отклонений средней точки попадания от контрольных точек необходимо откорректировать значение координат индивидуальной точки выверки описанным ранее способом.

3.6 Выводы по результатам третьего раздела

1. Разработаны методы повышения эффективности стрельбы по малоразмерным объектам на предельной дальности.

2. Обоснована необходимость применения алгоритмов сглаживания изображения при использовании электронного увеличения в момент прицеливания. Экспериментами подтвержден положительный эффект, заключающийся в повышении кучности стрельбы и в уменьшении времени прицеливания.

3. Спроектирована полностью герметичная конструкция с защитой от самопроизвольного срабатывания элементов управления прицелом, позволяющих вносить поправки при стрельбе способом аналогичным способу внесения поправок в классических оптических прицелах. Конструкция способствует упрощению работы с прибором за счет эффекта обратной связи прибора с пользователем, возникающего из-за ощущения тактильности в том числе при использовании перчаток в зимних условиях.

4. Предложен, теоретически исследован и подтвержден экспериментами способ повышения точности и кучности стрельбы путем индикации наличия завала оружия.

5. Предложено использование нескольких видов прицельных сеток, выбираемых пользователем прибора в зависимости от конкретных условий стрельбы и личных предпочтений.

6. Разработаны способ выверки прицела на оружии по одной группе выстрелов путем автоматического расчета необходимого смещения прицельного знака и способ бесстрельбовой выверки прицела по его индивидуальной точке выверки при использовании ствольного коллиматора.

4 ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЦИФРОВОГО ПРИЦЕЛА

Раздел посвящен рассмотрению основных конструктивных и технико-эксплуатационных характеристик цифрового прицела для стрелкового оружия. Дается описание используемых испытательных стендов для проверки технических характеристик, описание используемого программного обеспечения. Изложены общие принципы испытаний прицела. Приводятся результаты полигонных испытаний.

Основные тактико-технические характеристики прицела приведены в таблице 4

Таблица 4 – Тактико-технические характеристики цифрового прицела

Наименование характеристики	Значение
Формат фотоприемника	1280×960
Спектральный диапазон	0,4–0,9 мкм
Цветность изображения	монохромное
Кадровая частота	25 Гц
Разрешение дисплея	800×600
Цветность дисплея	цветной
Наблюдаемое поле зрения	9,6×7,2 °
Видимое увеличение	~6 крат
Дальность распознавания ростовой фигуры	не менее 800 м
Дальность обнаружения ростовой фигуры	не менее 1000 м
Тип прицельной шкалы	по выбору
Обеспечиваемая точность стрельбы	не хуже 1 МОА
Рабочий диапазон температур	–40...+50 °С
Класс устойчивости к пыли и влаге	IP67
Устойчивость к ударным нагрузкам (1 мс)	до 500g
Масса с аккумулятором	1,3 кг
Габаритные размеры без кронштейна	290×80×80 мм

4.1 Проверка устойчивости прибора к воздействиям внешней среды

Отличительной особенностью цифрового прицела по сравнению с приборами наблюдения является устойчивость к ударным нагрузкам, позволяющая использовать прицел на крупнокалиберном стрелковом оружии, а также на оружии, имеющем подствольный гранатомет. Устойчивость подразумевает как работоспособность прибора в момент нагрузки и после нее, так и стабильность положения линии прицеливания. Стабильность положения линии прицеливания прицела является одним из показателей качества прицельной техники [2, 161]. Для подтверждения устойчивости прибора осуществляется его испытание на имитационном ударном стенде.

Непосредственно перед испытанием производится измерение сбиваемости (отклонения) линии прицеливания при повторной установке прибора. Ее величина не должна превышать 0,5 МОА (30"), что является типовым значением для оптических прицелов, предназначенных для использования на высокоточном оружии.

Проверка отклонения линии прицеливания при повторной установке выполняется с использованием коллиматора, при помощи которого определяется отклонение центра прицельной марки относительно исходной точки, изображения в поле зрения коллиматора, после повторной установки изделия на посадочное место. Структурная схема измерения отклонения линии прицеливания показана на рисунке 61. Фрагмент поля зрения коллиматора представлен на рисунке 62, цена деления грубой сетки шкалы составляет 3 МОА, что приблизительно равно 1 тысячной дальности.

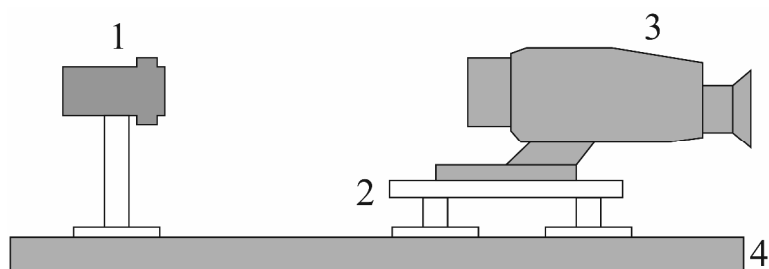


Рисунок 61 – Структурная схема измерения отклонения линии прицеливания

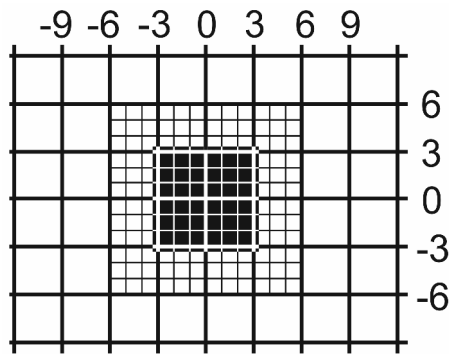


Рисунок 62 – Фрагмент поля зрения коллиматора

Перед выполнением проверки изделие (3) устанавливается на посадочное место (2) перед объективом коллиматора (1). И коллиматор, и посадочное место жестко закреплены на скамье (4), что препятствует их перемещению или повороту друг относительно друга. При помощи устройства выверки совмещается центр прицельной марки прибора с некоторой точкой, принимаемой за реперную. Такой точкой может быть выбран центр $\langle 0,0 \rangle$ изображенной в поле зрения коллиматора шкалы, угол затемненной области или иная точка. Затем изделие снимается с посадочного места и повторно устанавливается на него. После повторной установки проверяется положение центра прицельной марки относительно реперной точки.

Изделие считается выдержавшим проверку, если отклонение точки прицеливания не превышает величину 0,5 МОА. Противоречия в том, что эта величина является меньшей по сравнению с шагом шкалы коллиматора нет, так как измерение можно осуществлять не только в делениях шкалы, но также в пикселях изображения, наблюдаемого при помощи испытываемого прибора.

Испытание для определения работоспособности изделия и сбиваемости линии прицеливания после воздействия механических ударов многократного действия проводится на ударной электромеханической установке СМ-1М. Схематичное изображение размещения прибора на установке представлено на рисунке 63.

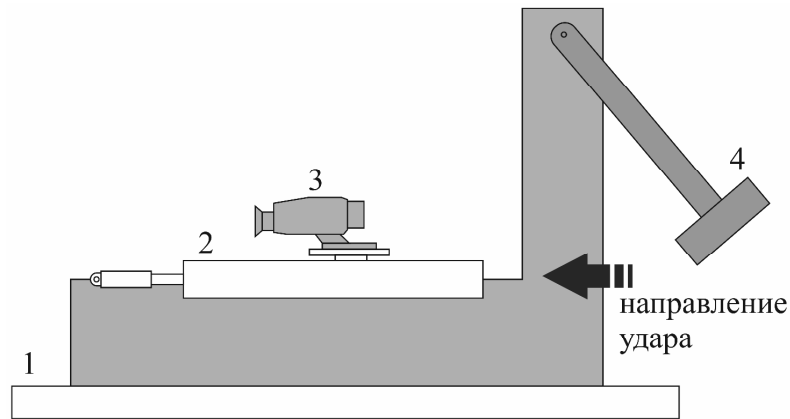


Рисунок 63 – Схема установки для испытания устойчивости к многократному воздействию ударных нагрузок. 1 – основание установки, 2 – «люлька» с посадочным местом, 3 – изделие, 4 – молот.

Прибор во включенном состоянии устанавливается в эксплуатационном положении на посадочном месте установки СМ-1М и затем подвергается многократной ударной нагрузке с пиковым ускорением $500g \pm 5\%$ и длительностью импульса $1\text{ мс} \pm 5\%$. Общее количество ударов – не менее 500.

Перед выполнением проверки производится фиксация положения линии прицеливания при помощи коллиматора. После окончания испытания проверяется сбиваемость линии прицеливания путем установки изделия на коллиматор и измерением величины ухода центра прицельной марки относительно реперной точки тест-объекта. Изделие считается выдержавшим испытание, после испытания оно остается работоспособным и при этом отклонение его линии прицеливания не превышает погрешность повторной установки.

Дополнительный контроль осуществляется при помощи автоматизированной системы [159], минимизирующей погрешности наведения прицельного знака в контрольную точку.

Помимо проверки устойчивости прибора к ударным нагрузкам производится проверка изделия на соответствие требованиям ГОСТ РВ 20.39.304-98 [103], и MIL-STD810 [104].

Испытание стойкости к воздействию рабочей пониженной температуры для определения работоспособности изделия во время и после воздействия на него пониженной рабочей температуры $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ проводится следующим образом. Перед

выполнением проверки фиксируется положение линии прицеливания изделия с помощью коллиматора. Затем изделие снимается с посадочного места коллиматора и во включенном состоянии помещается в климатическую камеру тепла и холода СМ70/90-250 КТХ с установившейся температурой $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, где оно выдерживается не менее двух часов. Расположение изделия в климатической камере должно обеспечивать возможность наблюдения на мониторе изображения тест-объекта, расположенного вне камеры (рисунок 64). В ходе испытания с интервалом не более 30 мин проверяется работоспособность изделия путем наблюдения изображения тест-объекта на дисплее изделия. Изображение на дисплее можно наблюдать либо через окно камеры, либо через установленную перед окуляром изделия телекамеру, подключенную к монитору, находящемуся вне камеры.

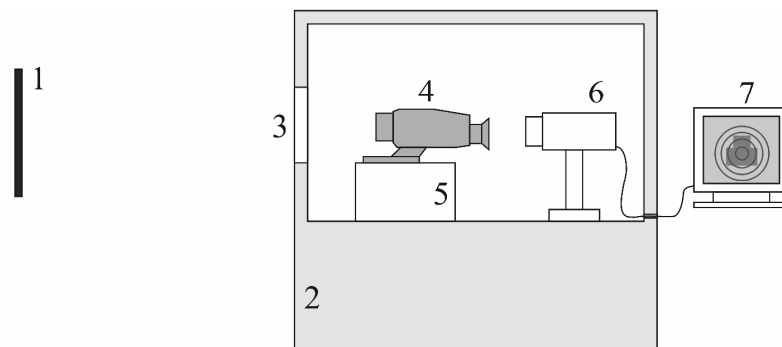


Рисунок 64 – Схема размещения изделия в климатической камере.
1 – тест-объект, 2 – климатическая камера, 3 – окно, 4 – изделие,
5 – подставка, 6 – телекамера, 7 – монитор

В качестве тест-объекта может использоваться стрелковая мишень или телевизионная тест-таблица (мира) [160], распечатанная на бумаге соответствующего размера. В обоих случаях тест-объект размещается на таком расстоянии от климатической камеры, чтобы его изображение занимало все поле зрения испытываемого прибора, и при этом объект находился «в фокусе» прибора.

По истечении двух часов изделие извлекается из климатической камеры и выдерживается в нормальных климатических условиях в течение 15 минут. Далее по описанной методике определяется отклонение линии прицеливания относительно первоначального положения.

Аналогичным образом производится испытание стойкости изделия к воздействию повышенной температуры +50 °С.

Изделие считают выдержавшим испытание, если изображение тест-объекта в процессе и после испытания было четким без существенного изменения контрастности, и отклонение линии прицеливания относительно первоначального положения после испытания не превышает погрешность повторной установки.

Для определения работоспособности изделия во время и после воздействия атмосферных осадков в виде дождя проводятся испытания в камере дождя КД-1, обеспечивающей равномерное обрызгивание водой с интенсивностью 5 мм/мин.

Изделие во включенном состоянии подвергается равномерному обрызгиванию водой поочередно с четырех боковых и верхней сторон под углом ~45° в течение не менее 2 ч. Расположение изделия в камере дождя при этом должно обеспечивать возможность наблюдения на мониторе изображения в поле зрения изделия тест-объекта, расположенного вне камеры. Зона действия дождя должна перекрывать габаритные размеры изделия не менее чем на 30 см. Температура воды в начале испытаний должна быть ниже температуры изделия на 5...10 °С.

В ходе испытания, с интервалом не более 30 мин, проверяется работоспособность изделия путем наблюдения изображения тест-объекта на дисплее изделия. Наблюдение осуществляется аналогично наблюдению при испытании прибора в климатической камере, схематично изображенному на рисунке 64. После испытания изделие протирается. Затем производится его осмотр с целью обнаружения проникновения влаги во внутренние полости. Изделие считают выдержавшим испытание, если в поле зрения изделия в процессе и после испытания наблюдалось изображение тест-объекта, и при этом не было допущено проникновения влаги внутрь корпуса.

Для определения работоспособности изделия после воздействия на него синусоидальной вибрации на одной из частот, находящейся в диапазоне частот 20...100 Гц при ускорении 19,6 м/с² (2g) проводится испытание на вибрационной электродинамической установке ВЭДС-400А. Испытание проводится на одной из

частот диапазона 20...100 Гц (не на резонансной частоте) при амплитуде виброускорения 2g, длительности ударного импульса 5...10 мс. Длительность воздействия синусоидальной вибрации должна быть не менее 30 мин. После окончания испытания производится проверка работоспособности изделия и измеряется величина ухода его линии прицеливания.

Для определения работоспособности изделия во время и после воздействия пониженного атмосферного давления ($450 \pm 17,5$) мм рт. ст. проводится испытание в термобарокамере TBV-8000. Изделие помещается в термобарокамеру во включенном состоянии. Расположение изделия в термобарокамере должно обеспечивать возможность наблюдения на видеомониторе изображения тест-объекта, расположенного в камере, через установленную перед окуляром изделия в термобарокамере телевизионную камеру, подключенную к видеомонитору.

Температуру в термобарокамере понижают до -20 °С и выдерживают не менее 1 ч. Затем понижают давление в термобарокамере в течение 30...40 мин до ($450 \pm 17,5$) мм рт.ст. Изделие выдерживают в термобарокамере при заданном давлении в течение не менее 1 ч. В ходе испытания с интервалом не более 15 мин проверяют работоспособность изделия путем наблюдения изображения тест-объекта на экране монитора. По истечении времени выдержки давление и температуру повышают до нормальных климатических условий и термобарокамеру открывают.

Изделие считают выдержавшим испытание, если изображение тест-объекта в процессе и после испытания было четким, и уход линии прицеливания при последующей установке изделия на коллиматор не превышает допустимую величину.

Прицел также подвергается иным испытаниям, таким как устойчивость к воздействию повышенной влажности, атмосферным осадкам, проверка механической прочности при имитации транспортной тряски и другим испытаниям, которым подвергаются приборы подобного класса. Методика испытаний описана в [103, 104].

Результаты испытаний на устойчивость прибора к воздействию многократных ударных нагрузок, вибрации, воздействию пониженной и повышенной температуры, давления, влажности и т.д. подтвердили возможность эксплуатации прицела в соответствующих условиях.

Отклонение линии прицеливания при повторной установке прибора на посадочное место по результатам испытаний не превышает 0,2 МОА. Величины отклонений линии прицеливания от воздействий внешней среды не превышают величину отклонения при повторной установке. Возможно, численное значение величины отклонения является еще меньшей, однако оно не может быть измерено с большей точностью из-за ограничений разрешающей способности прибора, которая в свою очередь ограничена шагом и числом элементов фотоприемника. Разрешающая способность может быть увеличена при использовании в конструкции прицела объектива с большим оптическим увеличением, но при этом во столько же раз уменьшится поле зрения прибора.

Испытания прицелов-аналогов на ударном стенде показали невозможность их использования на крупнокалиберном оружии. В частности, при воздействии серии из 5..10 ударов с ускорением $300g \pm 5\%$ с длительностью импульса $1 \text{ мс} \pm 5\%$ у приборов Digisight [42, 43], Armasight Drone Pro [46], ATN X-Sight [50] и Носильщик [56] наблюдается отклонение линии прицеливания приборов на величину от 2 до 5 МОА, а при воздействии с ускорением $500g$ наблюдается частичное механическое разрушение приборов и их выключение.

Подтвержденный испытаниями в климатической камере рабочий температурный диапазон $-40...+50 \text{ }^\circ\text{C}$, является более широким по сравнению с заявленным рабочим температурным диапазоном $-20...+50 \text{ }^\circ\text{C}$ упомянутых приборов.

4.2 Определение дальности распознавания и обнаружения

Проверка заключается в определении максимальной дальности наблюдения ростовой фигуры человека и автотранспортного средства, при которой видимость объекта наблюдения соответствует принятым критериям распознавания и обнаружения.

Проверка проводилась при следующих условиях окружающей среды:

- среднее значение температуры воздуха составило +8 °С;
- атмосферное давление – 745 мм рт.ст.;
- относительная влажность воздуха – 80%;
- вертикальная освещённость – $14 \cdot 10^3$ лк;
- горизонтальная освещённость – $12 \cdot 10^3$ лк;
- прозрачность атмосферы на испытательной трассе соответствовала нормальным условиям: отсутствие осадков, тумана, пыли, задымлённости и т.д.;
- протяженность испытательной трассы – 1400 м;
- в качестве объекта наблюдения использовалась ростовая фигура человека в обычной повседневной одежде, стоящего лицом в сторону исследуемого прицела, и легковой автомобиль;
- подстилающий фон – смешанный лес хвойных и лиственных пород;
- расстояние от объекта наблюдения до подстилающего фона составляло 400...50 метров, в зависимости от дальности расположения объекта наблюдения;
- при выполнении проверки был принят следующий критерий распознавания ростовой фигуры военнослужащего – видимость направления поднятых рук, критерий обнаружения – видимость объекта наблюдения в виде светлой точки; Критерий обнаружения автомобиля – движение светлой точки, распознавание – отличие типа автомобиля грузовой/легковой;
- погрешность определения расстояний от прибора до объекта наблюдения составила не более 1%;
- исследуемый прибор в ходе проверки закреплялся на штативе высотой 1,6 м

от поверхности земли;

- прибор был включен за 15 минут до начала выполнения проверки и не выключался в течение всего хода испытаний;

Для определения дальности распознавания была использована следующая методика. Объект наблюдения располагается на испытательной трассе вдоль линии визирования прицела на расстоянии, превышающем ожидаемую дальность распознавания. Прицел закреплялся на посадочном месте штатива, содержащего механизм наведения в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Вид испытательной трассы представлен на рисунке 65. По команде руководителя испытаний оператор приступал к наблюдению в окуляр прибора. Наблюдение производилось последовательно при номинальном значении видимого увеличения и цифровом увеличении с масштабными коэффициентами: 1, 3, 5, 7. Время одного наблюдения не превышало 30 с. Если в процессе наблюдения объект не был распознан, то уменьшалось расстояние (с дискретностью 50 м) между прицелом и объектом наблюдения. В случае, когда оператор (наблюдатель) определил, что видимость объекта соответствует критерию распознавания, фиксировалось расстояние от исследуемого прибора до объекта наблюдения, объект наблюдения перемещался на исходный рубеж, производилась замена наблюдателя, и испытания повторялись.

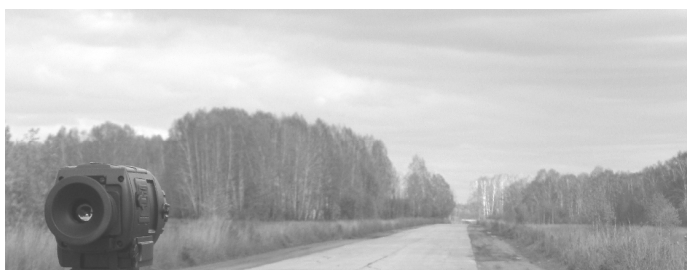


Рисунок 65 – Испытательная трасса.

В результате выполнения проверки установлено, что значение дальности распознавания ростовой фигуры человека с использованием цифрового прицела в условиях испытания составило: с номинальным значением видимого увеличения – 850 м с вероятностью 0,9, с использованием цифрового увеличения с масштабным коэффициентом «5» и «7» – до 1000 м с вероятностью 0,4. Значение

дальности обнаружения составило от 1000 до 1400 м (ограничено фактической протяженностью испытательной трассы). На расстоянии 1100 метров имеется возможность распознать легковой автомобиль от грузового. Обнаружение движущегося легкового автомобиля составило 1400 м (ограничено фактической протяженностью испытательной трассы).

4.3 Определение чувствительности прицела в сравнении с приборами-аналогами

Проверка заключается в определении минимального уровня освещенности объекта, при котором оператор способен увидеть этот объект в цифровой прицел. Кроме того, проводится сравнение с приборами аналогами для определения, какое из устройств является более чувствительным.

Проверка чувствительности осуществлялась в затемненном помещении. В качестве наблюдаемого объекта использовалась стандартная телевизионная проверочная мира (таблица) [160], размещенная на таком расстоянии, чтобы ее наблюдаемый размер вписывался в поле зрения прибора.

Освещенность в помещении постепенно увеличивалась, до тех пор, пока элементы тест-таблицы не становились отчетливо различимы оператором. После чего освещенность на тест-таблице измерялась люкс-метром 1ПН124. Подсветка и инфракрасные прожектора при проведении испытаний не применялись.

В момент проведения испытания оператор и окулярная часть прибора находятся под непрозрачной накидкой, полностью изолирующей их, чтобы свет дисплея не влиял на окружающую освещенность помещения.

Измеренная минимальная освещенность, при которой не происходит понижения кадровой частоты прибора и не происходит суммирования нескольких подряд идущих кадров, составила 0.004 лк, что соответствует условиям наблюдения при безлунном ясном звездном небе [39].

Одновременно наблюдения проводились в цифровые прицелы Digisight и Armasight Drone Pro. Эксперименты показали, что данным приборам для

отчетливого различения элементов тест-таблицы необходимо существенное повышение освещенности, по сравнению с макетным образцом разработанного цифрового прицела. Измеренная минимальная освещенность на тест-таблице, при которой ее элементы могли быть различены оператором для указанных приборов составила 0.05 лк.

Следует отметить, что данные измерения проводились не с целью измерения точного значения минимальной рабочей освещенности приборов, а с целью проведения их сравнительных испытаний, чтобы продемонстрировать преимущество использования объектива, реализующего широкий спектральный диапазон фотоприемника.

4.4 Оценка эксплуатационных свойств и тактико-технических характеристик

В ходе проведения испытаний было отмечено следующее:

1. Цифровой прицел обеспечивает достаточно комфортное наблюдение пространства и предметов с высоким качеством изображения.
2. Широкое поле зрения не менее $9,5 \times 7^\circ$ при номинальном увеличении обеспечивает высокую обзорность и оперативность поиска целей.
3. Применение электронного масштабирования позволяет упростить поиск и уменьшает время, затрачиваемое на наведение прицельного знака на малоразмерные цели.
4. Возможность выбора типа прицельных и дальномерных шкал, а также выбора их цвета обеспечивает приемлемую для оператора точность наведения в различных фоноцелевых условиях.
5. Смещение изображения относительно дисплея при неподвижной прицельной марке в центре поля зрения в момент внесения боковых и вертикальных поправок обеспечивает высокую обзорность, в том числе при больших углах прицеливания.

6. Наличие высокоскоростного порта HighSpeed USB 2.0 позволяет осуществлять связь прибора с широким набором высокотехнологичных коммуникационных устройств.

7. Конструкция органов управления прибора позволяет работу оператора в холодное время в перчатках. Их количество и расположение на корпусе прибора обеспечивает оперативность и комфортное управление всеми функциями прицела. Органы управления имеют защиту от самопроизвольного срабатывания, например при задевании прибором ветвей кустов, при складывании прибора на пол или приложении его к стенке.

Для оценки достигнутых тактико-технических характеристик, цифровой прицел был подвергнут стрельбовым испытаниям. Целью испытаний являлось определение готовности прицела для опытной войсковой эксплуатации. В ходе испытаний определялись показатели кучности, точности и эффективности стрельбы снайперских винтовок СВД и СВ-98, используемых совместно с испытуемым прицелом и прицелами-образцами сравнения. В качестве образцов сравнения были приняты следующие прицелы: прицел ночного видения 1ПН93-4 (в составе винтовки СВД) и дневной панкратический прицел ППО 3-12×36Ф (в составе винтовки СВ-98).

Стрельба на кучность из СВД осуществлялась на дальности 100 м, а из СВ-98 на 300 м. Стрельба на 300 м из винтовки СВ-98 обусловлена ее более высокой кучностью, чем СВД, что при предварительных оценочных стрельбах на дальности 100 м привело к трудностям в определении показателей кучности из-за близости расположения пробоев по отношению друг к другу (поперечник рассеивания ~2 см). Стрельба велась из положения «лежа» по 10 выстрелов для каждого прицела с последующим определением показателей кучности расположения пробоев. В качестве точки прицеливания принимался центр нижнего основания головной фигуры (стандартная мишень №5 [162]), изображенной на рисунке 66. Результаты определения показателей кучности представлены в таблицах 5 и 6. Под поперечником рассеивания понимается

ширина полосы, вмещающей в себя 100 % попаданий. Под сердцевинной полосой понимается ширина полосы, вмещающей в себя 70 % попаданий [163].

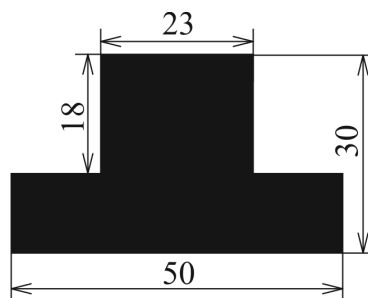


Рисунок 66 – Головная фигура (мишень №5). Размеры в сантиметрах

Таблица 5 – Показатели кучности стрельбы на дальности 100 м

Наименование оружия и прицела	№ серии выстрелов	Показатели кучности		
		Поперечник рассеивания		Площадь рассеивания $P_B \times P_{B_1}$, см ²
		По высоте P_B , см	По боковому направлению P_{B_1} , см	
СВД совместно с цифровым прицелом	1	7	6	42
	2	7	6,5	45,5
	среднее	7	6,25	43,75
СВД совместно с 1ПН93-4	1	7	8	48
	2	7,5	6	45
	среднее	7,25	7	50,75

Из таблицы 5 видно, что показатели кучности стрельбы с обоими прицелами близки и соответствуют технической кучности винтовки, с незначительным преимуществом цифрового прицела, очевидно вследствие возможности выбора оптимальных для данных условий испытаний параметров наблюдаемого изображения: яркости, контрастности, масштаба изображения, типа прицельного знака и его цвета.

Таблица 6 – Показатели кучности стрельбы на дальности 300 м

Наименование оружия и прицела	№ серии выстрелов	Показатели кучности		
		Сердцевинная полоса		Площадь сердцевины рассеивания $C_B \times C_B, \text{см}^2$
		По высоте $C_B, \text{см}$	По боковому направлению $C_B, \text{см}$	
СВ-98 совместно с цифровым прицелом	1	7	7	49
	2	7,5	6	45
	среднее	7,25	6,5	47,1
СВ-98 совместно с ППО 3-12×36Ф	1	4	7,5	30
	2	9	7,5	72
	среднее	6,5	7,5	48,8

Из таблицы 6 видно, что показатели кучности стрельбы из СВ-98 на дальности 300 м для обоих прицелов близки в пределах 5%, что не превышает ошибки измерений и обработки данных.

Между группами выстрелов в рамках стрельбовых испытаний также проверялось смещение положения визирной оси прицелов при помощи оптико-электронного устройства контроля [164].

Проверка по определению показателей точности стрельбы заключалась в осуществлении последовательной стрельбы из снайперской винтовки СВ-98 с цифровым прицелом по мишеням типа «грудная фигура», удаленным на расстояния 400 и 500 м. В качестве критерия точности принималось, что отклонение средней точки попаданий от контрольной точки должно составлять не более одной угловой минуты.

В ходе выполнения проверки в цифровом прицеле устанавливался угол прицеливания, соответствующий фактической дальности расположения мишеней: 400 и 500 м. Результаты определения показателей точности представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Показатели точности стрельбы из винтовки СВ-98

Дальность расположения мишени, м	Отклонения СТП от точки прицеливания			
	по высоте		по боковому направлению	
	сантиметры	угловые минуты	сантиметры	угловые минуты
400	5 (вниз)	0,4 (вниз)	5 (вправо)	0,4 (вправо)
500	4 (вверх)	0,3 (вверх)	6 (вправо)	0,5 (вправо)

Из таблицы 7 видно, что отклонения средней точки попаданий (СТП) относительно точки прицеливания, являющейся контрольной точкой составляют не более 0,5 угловых минут, как по высоте, так и по направлению, что в два раза меньше (точность выше) принятого критерия точности и соответствует типовым требованиям для высокоточных снайперских прицелов.

В качестве показателя эффективности стрельбы, использовалась вероятность попадания в типовую цель, расположенную на заданной дистанции. Определение вероятности попадания в цель производилось по формуле (36), используя данные таблицы значений вероятности Φ , приведенные в [163].

$$p = \frac{1}{4} \left[\Phi \left(\frac{y_1}{B_B} \right) \pm \Phi \left(\frac{y_2}{B_B} \right) \right] \cdot \left[\Phi \left(\frac{z_1}{B_B} \right) \pm \Phi \left(\frac{z_2}{B_B} \right) \right] \quad (36)$$

где Φ – функция вероятности попадания, y_1, y_2 – расстояния от оси рассеивания (СТП) по высоте, до дальнего и ближнего края цели, z_1, z_2 – расстояния от оси рассеивания (СТП) по боковому направлению, до дальнего и ближнего края цели, B_B, B_B – суммарные срединные отклонения, по высоте и боковому направлению. Для расчетов расстояний используются приведенные размеры цели [163].

Для определения величин срединного отклонения использовался способ, заключающийся в практической стрельбе на заданную дальность (500 м), графическом определении величины отклонений пробоев от средней точки попаданий и нахождения аналитическим путем искомых значений срединных отклонений по высоте и направлению для каждого прицела.

В цифровом прицеле устанавливалось видимое увеличение 8 крат, в прицеле ППО 3-12×36Ф – 12 крат. Результаты стрельбы из винтовки СВ-98 с цифровым прицелом и прицелом ППО 3-12×36Ф представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Отклонения пробоев от средней точки попаданий на дальности 500 м

№ пробоев	Отклонения пробоев от средней точки попаданий при стрельбе с цифровым прицелом		Отклонения пробоев от средней точки попаданий при стрельбе с ППО 3-12×36Ф	
	по высоте, мм	по боковому направлению, мм	по высоте, мм	по боковому направлению, мм
1	53,8	40,2	0,4	36,0
2	59,1	74,0	19,8	71,1
3	7,5	90,6	42,8	47,6
4	41,2	11,2	59,4	35,8
5	74,5	85,2	40,7	80,1
6	23,0	50,4	5,6	70,3
7	77,8	8,3	41,0	51,4
8	29,5	27,5	80,5	80,9
9	71,2	10,8	29,4	25,1
10	54,7	75,3	20,2	17,0

Для вычисления средних отклонений в соответствии с [163] использовалась следующая зависимость между среднеквадратической ошибкой и средним отклонением [163]:

$$B = 0,67 \cdot S \quad (37)$$

где B – средняя ошибка, S – среднеквадратическое отклонение.

Среднеквадратическое отклонение по высоте S_B определялось по следующей формуле:

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum Y^2}{n-1}} \quad (38)$$

где Y – отклонения пробоев по высоте относительно средней точки попаданий, n – количество выстрелов.

Аналогичным образом определялось среднеквадратическое отклонение по боковому направлению, S_B :

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum Z^2}{n-1}} \quad (39)$$

где Z – отклонения пробойн по боковому направлению относительно средней точки попаданий.

С помощью формул 37–39 и данных таблицы 8, получены значения срединных отклонений для исследуемых прицелов, приведенные в таблице 9.

Таблица 9 – Значения срединных отклонений при стрельбе из СВ-98 на дальность 500 м

Наименование оружия и прицела	Срединные отклонения по высоте, мм	Срединные отклонения по боковому направлению, мм
СВ-98 совместно с цифровым прицелом	38,2	39,8
СВ-98 совместно с ППО 3-12×36Ф	29,0	39,6

С помощью формулы (36) были получены значения вероятности попадания в мишень типа «головная фигура», расположенную на дальности 500 м от рубежа открытия огня. Значения вероятности получены для двух вариантов стрельбы: средняя точка попаданий (СТП) совпадает с контрольной точкой (КТ) при приведении оружия к нормальному бою (идеальный случай, но на практике труднодостижим) и средняя точка попаданий отклонена от контрольной точки на расстояние до 1 см на дальности 100 м, что будет соответствовать ~ 5 см на дальности 500 м. Приведенные размеры мишени типа «головная фигура» – ширина 410 мм, высота 250 мм [163]. Результаты расчетов для обоих вариантов стрельбы представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Вероятность попадания в цель типа «головная фигура» на дальности 500 м

Наименование оружия и прицела	Вероятность попадания в цель типа «головная фигура»	
	без учета отклонения СТП от КТ при приведении оружия к нормальному бою	с учетом отклонения СТП от КТ при приведении оружия к нормальному бою
СВ-98 совместно с цифровым прицелом	0,974	0,902
СВ-98 совместно с ППО 3-12×36Ф	0,996	0,955

Из таблицы 10 видно, что при стрельбе из винтовки СВ-98 без учета отклонения средней точки попаданий от контрольной точки при приведении оружия к нормальному бою вероятность попадания в цель типа «головная фигура» для обоих прицелов близка к предельному значению, с незначительным преимуществом (2 %) дневного прицела ППО 3-12×36Ф перед цифровым. При стрельбе с учетом отклонения средней точки попаданий при приведении оружия к нормальному бою вероятность попадания с дневным прицелом ППО 3-12×36Ф выше на 5 %, чем с цифровым прицелом.

4.5 Выводы по результатам четвертого раздела

1. Испытания цифрового прицела на ударном стенде показали возможность его использования на крупнокалиберном стрелковом оружии.

2. Прибор является устойчивым к воздействиям внешней среды в объеме требований стандартов ГОСТ РВ 20.39.303-98 и MIL-STD-810G.

3. Дальность распознавания ростовой фигуры составила более 800 м, а дальность обнаружения ростовой фигуры составила более 1000 м, что соответствует заявленным требованиям.

4. Продемонстрировано преимущество использования объектива, реализующего широкий спектральный диапазон фотоприемника при наблюдении в условиях низкой освещенности.

5. Кучность стрельбы из снайперских винтовок СВД и СВ-98 на дальности до 300 м с цифровым прицелом, не уступает современным ночным и дневным телескопическим прицелам, что свидетельствует о стабильности положения линии визирования цифрового прицела и о высоком качестве его изображения в широком диапазоне условий наблюдения.

6. Максимальные значения показателей точности стрельбы из винтовки СВ-98 с цифровым прицелом на дальностях 400 и 500 м составили 0,5 угловых минут, что в два раза меньше (соответственно, точность выше) принятого критерия точности и соответствует типовым требованиям, принятым для дневных снайперских прицелов.

7. Эффективность стрельбы из винтовки СВ-98 с цифровым прицелом по головной фигуре, расположенной на дальности 500 м близка к предельно высокому значению. По вероятности попадания цифровой прицел лишь на 5% уступает дневному оптическому прицелу ППО 3-12×36Ф, имеющего принципиально более высокую разрешающую способность и видимое увеличение оптической системы.

8. Результаты полигонных испытаний показали, что, в большинстве условий цифровой прицел по основным показателям стрельбы практически не уступает образцам сравнения – и ночным, и дневным прицелам, т.е. является фактически всесуточным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны и исследованы методы адаптации оптико-электронного прицела к меняющейся целефоновой обстановке, что позволяет вести наблюдения без необходимости настройки прибора под конкретные условия.

2. Предложен и реализован способ выверки и учета поправок путем смещения изображения относительно неподвижной прицельной марки, расположенной по центру дисплея, что позволяет увеличить информативность поля зрения прибора.

3. Предложен и исследован алгоритм сглаживания изображения, увеличенного электронным способом, применение которого повышает эффективность стрельбы по малоразмерным объектам на предельной дальности.

4. Разработан и исследован методы повышения точности и кучности стрельбы путем индикации наличия бокового наклона.

5. Результаты испытаний прицела показали возможность его использования на высокоточном оружии.

6. Материалы диссертационного исследования используются в научно-производственной деятельности ИАиЭ СО РАН и Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ИК – инфракрасный

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

КМОП-фотоприемник – фотоприемник, выполненный на основе КМОП технологии

КТ – контрольная точка

ОС – операционная система

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ПЗС-процессор – процессор, обеспечивающий взаимодействие цифровых цепей с ПЗС-фотоприемником

ПЗС-фотоприемник – фотоприемник, выполненный по технологии ПЗС

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

СТП – средняя точка попаданий

УФ – ультрафиолетовый

ЭОП – электронно-оптический преобразователь

FRAM – ферроэлектрическое запоминающее устройство с произвольным доступом

SDRAM – синхронное динамическое оперативное запоминающее устройство

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ананьев, И.Н. Основы устройства прицелов / И.Н. Ананьев. – М.: Воен. Изд-во, 1947. – 440 с.
2. Прицелы оптические и электронно-оптические для стрелкового оружия. Специальные технические требования. Методы испытания: ПР 78.01.0020-2009: утв. М-во внутренних дел Российской Федерации 25.12.2009.
3. Richardson, M. A. Surveillance and target acquisition systems, Second Edition / M. A. Richardson [et al]. – London: Brassey's (UK) Ltd., 1997. – 260 pp.
4. Грузевич Ю.К., Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю.К. Грузевич. – М.: Физматлит, 2014. – 276 с.
5. Голицын, А.А. Цифровые прицелы для стрелкового оружия: их преимущества и недостатки / А.А. Голицын // Вопросы оборонной техники. Сер.16: Технические средства противодействия терроризму. – 2013. – № 7-8. – С. 121–123.
6. Тарасов, В.В. Современные проблемы оптотехники: учебное пособие / В.В. Тарасов, И.П. Торшина, Ю.Г. Якушенков. – М.: МИИГАиК, 2014. – 82 с.
7. Cutshaw, C.O. Infantry Weapons Aim at Integration Age - The Next Round of Requirements for Individual Weapons Take Shape / C.O. Cutshaw, R. Pengelley. // International Defense Review. – 2000. – Vol. 33. – No. 10. – P. 46–53.
8. Волков, В.Г. Технология прицелов «день-ночь» / В.Г. Волков // Специальная техника. – 2001. – № 4. – С. 2–7.
9. Chapman, T. The off-axis viewing device: a rifle-mounted sighting system for search and engagement from covered positions / T. Chapman, C. Brady // In proc. SPIE, Vol. 6558, Display Technologies and Applications for Defense, Security and Avionics. (Florida, United States, 2007), 655805.
10. Волков, В.Г. Малогабаритные ночные прицелы / В.Г. Волков // Специальная техника. – 2004. – № 1. – С. 12–23.
11. Куликов, А.Н. Телевизионное наблюдение в сложных условиях / А.Н. Куликов // Специальная техника. – 2000. – № 35. – С 30–33.
12. Holst, G. Electro-optical imaging system performance / G. Holst. – US, SPIE press. 2003. – 442 pp.

13. Бельский, А.Б. Способы адаптации телевизионных систем к условиям изменения освещенности на местности / А.Б. Бельский, Б.Н. Сеник, А.Б. Сухачев // Оптический журнал. – 2005. – № 4. – С. 38–43.
14. Голицын, А.А. Обзор современных цифровых прицелов для стрелкового оружия / А.А. Голицын // Труды Девятой всероссийской научно-практической конференции «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму» – СПб.: Любавич. – 2014. – С. 155–166.
15. Энциклопедия. XXI век. Оружие и технологии России. Том XI. Оптико-электронные системы и лазерная техника / под общ. ред. С.Б. Иванова – М.: ИД «Оружие и технологии», 2005. – 720 с.
16. Точприбор. Том I. Оптические и оптико-электронные приборы, системы прицеливания, разведки и наблюдения для сухопутных войск / отв. ред.-сост. В.В. Малинин – Новосибирск: Наука, 2011. – 412 с.
17. Телевизионный прицел: свидетельство № 67805 Российская Федерация / Смирнов В.Д., Шевко А.С., Шевко Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГУП «НИИТ» – заявка № 2007114316/22; заявл. 16.04.2007; опубл. 27.10.2007.
18. Digital riflescope: пат. 10105036 A1 Германия / Plank Franz – заявка № 2001105036; заявл. 05.02.2001; опубл. 08.08.2002.
19. Electronic weapon site: пат. 20100236535 A1 США / Jerry Rucinski – заявка № 12/727,847; заявл. 19.03.2010; опубл. 23.09.2010.
20. Digital display linear gun scope: пат. 202361890 U Китай – заявка № 201010222662; заявл. 01.12.2011; опубл. 01.08.2012.
21. Digital sighting device: пат. 202018237 U Китай – заявка № 201120005438; заявл. 10.01.2011; опубл. 26.10.2011.
22. Digital video riflescope: пат. 101900514 В Китай – заявка № 201010222662; заявл. 10.07.2010; опубл. 19.09.2012.
23. Weapon sight: пат. 20120097741 A1 США / Philip B. Karcher – заявка № 13/281,318; заявл. 25.10.2011; опубл. 26.04.2012.
24. Method and apparatus for safe operation of an electronic firearm sight: пат. 20060248777 A1 США / James Florence, Clay Towerly – заявка № 11/021,752; заявл. 23.12.2004; опубл. 09.11.2006.
25. Electronic sight for firearm, and method of operating same: пат. 2569721 С Канада / Phillip A. Cox, James M. Florence – заявка № 2569721; заявл. 6.06.2005; опубл. 17.09.2013.

26. Electronic Firearm Sight and method for adjusting the reticle thereof: пат. 20120090216 A1 США / Danyun Li – заявка № 12/911,525; заявл. 25.10.2010; опубл. 19.04.2012.
27. Зайдель, И.Н. Электронно-оптические преобразователи / И.Н. Зайдель, Г.И. Куренков – М.: Советское радио, 1970. – 56 с.
28. Лазовский, Л. Приборы с зарядовой связью: прецизионный взгляд на мир [Электронный ресурс], – Режим доступа: <http://www.autex.spb.ru/download/sensors/ccd.pdf>
29. Горбачев, А.А., , Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе / А.А. Горбачев, В.В. Коротаев, С.Н. Ярышев. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 98 с.
30. Шлычков, В. И. Круглосуточный телевизионный канал / В.И. Шлычков, К.В. Макаров // Прикладная физика. – 2007. – № 3. – С. 121–124.
31. Волков, В.Г. Тепловизионные приборы средней дальности действия / В.Г. Волков // Специальная техника. – 2005. – № 4. – С. 2–17.
32. Бутримов, И.С. Тепловизионные прицелы для стрелкового оружия: итоги выставки «Комплексная безопасность 2014» / И.С. Бутримов, А.А. Голицын // Спецтехника и связь. – 2014. – № 5. – С. 12–16.
33. Голицын, А.А. Глазом тепловизора / А.А. Голицын // Наука из первых рук. – 2014. – Т. 57-58. – № 3-4. – С. 198–203.
34. Колючкин, В.Я. Тепловизионные приборы и системы / В.Я. Колючкин, Г.М. Мосягин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 60 с.
35. Прицельный комплекс 1ПН137 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.jupiter-optics.com/прицельный-комплекс-1пн137>
36. Owens, D.A. Effects of luminance, blur, and age on nighttime visual guidance: A test of the selective degradation hypothesis / D.A. Owens, R.A. Tyrrell // Journal of Experimental Psychology: Applied. – Vol. 5(2). – Jun 1999. – Pp. 115–128
37. Qui, Y. The relationship of Image quality of Image intensifier and the luminance of its background / Y. Qui, B. Chang, L. Sun, Y. Gao, S. Tiang, Y. Qian // Proc. SPIE 6621, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Photoelectronic Imaging and Detection. – 2008. – 66210R. – 6 pp.
38. Александров, Е. Ночные прицелы. Разница в мелочах / Е. Александров // Калашников. – 2004. – № 2. – С. 34–38.

39. Шаронов, В.В. Наблюдение и видимость / В.В. Шаронов – М.: Воениздат, 1963. – 77 с.
40. Бутримов, И.С. Повышение точности стрельбы при использовании цифрового прицела с помощью системы индикации сваливания оружия / И.С. Бутримов, А.А. Голицын, С.С. Мишанин // Специальная техника. – 2012. – № 5. – С. 48–53.
41. Маркевич, В.Е. Охотничье и спортивное стрелковое оружие / В.Е. Маркевич. – М.: Полигон, 2005. – 256 с.
42. Смирнов, А., Дигисайт 2.0. Новый ночной цифровик от Pulsar / А. Смирнов // Основной инстинкт. – 2012. – № 5. – С. 46–47
43. Шаханов, Д. Digisight 900-ой серии. Новые возможности проверенной линейки / Д. Шаханов // Магия настоящего сафари. – 2016. – № 7. – С. 44–46
44. Digisight Ultra N335: руководство пользователя / Pulsar – Pulsar, 2017. – 213 с.
45. Шаханов, Д. Digisight Ultra N355. Новый цифровой прицел от Pulsar / Д. Шаханов // Магия настоящего сафари. – 2017. – №7. – С. 86–88.
46. Drone Pro. Digital Night Vision Riflescopes [Информационный буклет] / Armasight Inc. – 2013.
47. Цифровые прицелы ночного видения Photon RT [Информационный буклет] / Yukon Advanced Optics Worldwide. – 2016.
48. Бойко, А., Digisight серии А. Третья инкарнация популярного прицела / А. Бойко // Русский охотничий журнал. – 2013. – № 10. – С. 130–131.
49. Drone Pro 5x, Drone Pro 5x-10x Digital Night Vision Riflescopes. Operation and Maintenance Manual – USA, South San Francisco: Armasight Inc., 2013. – 40 p.
50. Ночная оптика. ПНВ, тепловизионные и цифровые приборы и прицелы // Оружейный портал Guns.ru [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://forum.guns.ru/forumtopics/209.html>
51. Голицын, А.А. Преимущества и недостатки цифровых прицелов для стрелкового оружия / А.А. Голицын // Спецтехника и связь. – 2012. – № 5-6. – С. 14–18.
52. Бойко, А. N770. Самый «русский» Digisight / А. Бойко // Охота. – 2013. – № 2. – С. 82–85.
53. Телевизионный прицел 141.819-02 «Puma-TV» // Каталог продукции ГВУП «Белспецвнештехника», 2015.

54. Бутримов, И.С. Новые отечественные разработки автоматизированных прицелов для снайперских винтовок и результаты их полигонных испытаний / И.С. Бутримов [и др.] // В сборнике Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2009. – Т. 5. – № 1. – С. 22–25.
55. Цифровой телевизионный прицел «Носильщик» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://oesd.ru/carrier.html>
56. Федоринин, В.Н., Прицельный комплекс для спецподразделений / В.Н. Федоринин [и др.] // Техническая оснащенность подразделений МВД России: настоящее и будущее: сборник докладов VII заседания Координационного совета по научно-техническому сотрудничеству между ФКУ НПО «СТиС» МВД России и Сибирским отделением РАН – М.: ФКУ НПО «СТиС», 2013. – 84 с.
57. Lee Hutchinson, \$17,000 Linux-powered rifle brings “auto-aim” to the real world. Austin-based startup makes “Precision Guided Firearms” sporting a lot of tech [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://arstechnica.com/gadgets/2013/01/17000-linux-powered-rifle-brings-auto-aim-to-the-real-world/>
58. Steve Johnson, Remington 2020: Digital Scopes Go Mainstream [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.thefirearmblog.com/blog/2013/09/25/breaking-news-remington-2020-digital-scopes-mainstream/>
59. Первая «умная» винтовка [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://topwar.ru/34937-pervaya-umnaya-vintovka.html>
60. Rifle Scope with Video Output Stabilized Relative to a Target: пат. 20130286239 А1 США / John Hancock Luper, John Francis McHale, Douglas Ainsworth Scott – заявка № 13/460,817; заявл. 30.04.2012; опубл. 31.10.2013
61. Rifle Scope and Method of Providing Embedded Training: пат. 20130288205 А1 США / John Hancock Luper, John Francis McHale – заявка № 13/460,829; заявл. 30.04.2012; опубл. 31.10.2013
62. Trigger Assembly and Method of Optical Detection of a Trigger Assembly State: пат. 20130180147 А1 США / John Hancock Luper, Hillman Lee Bailey, Michael Eric Reimers – заявка № 13/351,220; заявл. 16.01.2012; опубл. 18.07.2013

63. Lee Hutchinson, Bullseye from 1,000 yards: Shooting the \$17,000 Linux-powered rifle. ARM CPUs, lasers, and Wi-Fi make firing this weapon an experience like no other. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://arstechnica.com/gadgets/2013/03/bullseye-from-1000-yards-shooting-the-17000-linux-powered-rifle/>
64. Night Vision and Thermal Imaging Optics. ATN Corp. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.atncorp.com/>
65. Ковалев, А.М. Виртуальное пространство в сферической перспективе / А.М. Ковалев // Оптический журнал. – 1999. – Т. 66. – № 6. – С. 127–135.
66. Голицын, А.А. Применение ретинальных дисплеев в составе оптико-электронных приборов наблюдения и прицельных комплексов / А.А. Голицын // Материалы двадцать первой Всероссийской конференции студентов-физиков и молодых ученых (г. Омск, 26 марта – 2 апреля 2015 г.) – Омск: АСФ России, 2015. – С. 294–295.
67. Magnan, P. Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view / P. Magnan // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 504. – 2003. – P. 199–212
68. Войцеховский, А.В. Физические основы полупроводниковой фотоэлектроники: Учеб. Пособие / А.В. Войцеховский [и др.]. – Томск: ТГУ, 2013. – 560 с.
69. Бирюков, Е. Эволюция датчиков изображения: от ПЗС к КМОП / Е. Бирюков // Компоненты и технологии. – 2007. – № 10. – С. 24–27.
70. Джакония В.Е. Телевидение / В.Е. Джакония. – М.: Горячая линия - Телеком, 2002. – 640 с.
71. Войтов, В.А., Способ формирования единого информационного поля / В.А. Войтов [и др.] // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 12. – С. 84–87.
72. ICX445ALA Diagonal 6.0mm (Typ1 1/3) Progressive Scan CCD Image Sensor for V/W Cameras [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sony.net/Products/SC-HP/datasheet/01/data/E06613D34.pdf>
73. SVGA+ Rev3 XL Series Active Matrix OLED Microdisplay. User's Specification. Rev. 4 – USA: eMagin Corporation, 2010. – 46 p.
74. SVGA060 Series Low-Power AMOLED Microdisplay. Data Sheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.highnessmicro.com/lcdpanelspdf/SVGA060.pdf>

75. Голицын, А.А. Применение в цифровых прицелах фотоприемников с избыточным разрешением / А.А. Голицын // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники», г. Владимир, 13–14 ноября 2014 г. – М.: Издательство РАРАН, 2014. – С. 37–38.
76. Выверка прицелов, проверка боя и приведение к нормальному бою артиллерийского вооружения: учебно-методическое пособие / под общ. ред. Н.П. Ровенского [и др.] – Пермь: Звезда, 2001. – 72 с.
77. Голицын, А.А. О необходимости применения в цифровых прицелах фотоприемников с избыточным разрешением / А.А. Голицын // Спецтехника и связь. – 2015. – № 1. – С. 17–19.
78. Изделие ПСО-1С (индекс 6Ц1С). Техническое описание и инструкция по эксплуатации. АЛЗ.812.000-01 ТО – Новосибирск: НПЗ, 1990. – 42 с.
79. Обработка изображений и цифровая фильтрация / под ред. Т.С. Хуанга, пер. с англ. Сорока Е.З., Хлебородов В.А. – М.: Мир, 1979. – 318 с.
80. Быков, Р.Е. Цифровое преобразование изображений: учеб. пособие для вузов / Р.Е. Быков [и др.]. – М.: Горячая линия - Телеком, 2003. – 228 с.
81. Chang, C. Integrated Operation of Image Capturing and Processing in FPGA / C. Chang, P. Hsiao, Z. Huang // International Journal of Computer Science and Network Security. 2006. – Vol. 6. – No.1A. – P. 173–179.
82. Yan, B. Design of CMOS image acquisition system based on FPGA / B. Yan // Industrial Electronics and Applications, 6th IEEE Conference. – 2011. – Pp. 1726–1730.
83. Johnston, C. T. Implementing Image Processing Algorithms on FPGAs / C.T. Johnston, K.T. Gribbon, D.G. Bailey // Proc. Eleventh Electronics New Zealand Conference, Palmerston North, New Zealand. – Nov. 2004. – Pp. 118–123.
84. Hauck, S. Reconfigurable computing: the theory and practice of FPGA-based computation / S. Hauck, A. Dehon. – USA, Burlington: Elsevier Inc., 2008. – 945 p.
85. 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.
86. Burger, W. Principles of Digital Image Processing. Core Algorithms, 1st Edition / W. Burger, M. J. Burge. – Springer, 2009. – 329 p.

87. Голицын, А.А., Аппаратно-программный комплекс получения и обработки изображения в реальном времени для переносимого прибора наблюдения или прицела / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи, А.К. Дмитриев // Материалы девятнадцатой всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-19 – Архангельск: Издательство АСФ России, 2013. – С. 435–436.
88. Голицын, А.А., Тепловизионный канал на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров / А.А. Голицын [и др.] // Оптический журнал. – 2013. – Т. 80. – №6. – С. 8–13.
89. VSP2582. CCD Analog Front-End for Digital Cameras / Texas Instruments [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/gpn/vsp2582>
90. Low Power, High Speed CCD Buffer Amplifier. ADA4800 / Analog Devices [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADA4800.pdf
91. Петропавловский, Ю. Особенности применения ПЗС-матриц с межстрочным переносом / Ю. Петропавловский // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5.
92. VSP1900 CCD Vertical Driver With Sub Bias Switch for Digital Cameras [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://digichip.ru/datasheet/PDF/765cae16dd1ed2e452583ef1ccac4b2d/a5771bce93e200c36f7cd9dfd0e5deaa/VSP1900DBTR.pdf>
93. Altera FPGAs [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.altera.com/devices/fpga/fpga-index.html>
94. Direct Memory Access // ADSP-BF533 Blackfin Processor Hardware Reference, Rev. 3.6, Feb. 2013 / Analog Devices, Inc. – USA, Norwood: Analog Devices, 2013. – Pp. 359–430.
95. 256Mb: x4, x8, x16 SDRAM Features / Micron [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.micron.com/~media/Documents/Products/Data%20Sheet/DRAM/256Mb_sdr.pdf
96. Долгушин, С. Высокоскоростные контроллеры USB производства компании Cypress / С. Долгушин // Компоненты и технологии. – 2006. – № 6. – С. 116–119

97. Голицын, А.А. Приложение для настройки режимов работы и для управления теле- или тепловизионным прибором наблюдения / А.А. Голицын // Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения – М.: ОАО «НПО «Орион», 2014. – С. 142–144.
98. Хульцебош, Ю. Измерение, управление и регулировка при помощи интерфейсов ПК / Ю. Хульцебош // USB в электронике: пер. с нем. 2-е изд., испр. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – С. 11–17.
99. Brown, G. Discovering the STM32 Microcontroller / G. Brown. – Indiana University, 2016. – 244 p.
100. FM25V10 1Mb Serial 3V F-RAM Memory [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.terraelectronica.ru/pdf/RAMTRON/FM25V10-G.pdf>
101. Голицын, А.А. Схема управления питанием носимого прибора наблюдения / А.А. Голицын // Известия ВУЗов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 3. – С. 275–281.
102. Sachdev, P. 0V to 18V Ideal Diode Controller saves Watts and space over Schottky / P. Sachdev // Linear Technology Magazine. – 2008. – Sep. – Pp. 24–31.
103. ГОСТ РВ 20.39.303-98. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к надежности. Состав и порядок задания.
104. MIL-STD-810G. Department of Defense Test Method Standard for Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests – Министерство обороны США, 2008.
105. Хоровиц, П., Ключи на полевых транзисторах // Искусство схемотехники. Издание 5-е, переработанное / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с английского: Бронин Б.Н. [и др.] – М.: Мир, 1998. – С. 149–180.
106. Si4497DY P-Channel 30V (D-S) MOSFET [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.vishay.com/docs/65748/si4497dy.pdf>
107. SiA466EDJ N-Channel 20-V (D-S) MOSFET [Электронный ресурс] – <http://www.vishay.com/docs/62955/sia466edj.pdf>
108. Falin, J. Reverse Current/Battery Protection Circuits / J. Falin // Application Report SLVA139 – USA, Dallas: Texas Instruments, 2003. – 3 p.
109. Si7336ADP N-Channel 30-V (D-S) MOSFET [Электронный ресурс] – <http://www.vishay.com/docs/73152/si7336ad.pdf>

110. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. – М.: Группа ИДТ, 2007. – 616 с.
111. Ардизони, Дж. Практическое руководство по разработке печатных плат для высокочастотных схем / Дж. Ардизони // Компоненты и технологии. – 2007. – № 12. – С. 157–162.
112. Джонсон, Г. Слои земли и компоновка многослойной печатной платы // Конструирование высокоскоростных цифровых устройств. Начальный курс черной магии / Г. Джонсон, М. Грэхем; пер. с англ. и редакция С.А. Добродеева. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – С. 279–323.
113. Методы проектирования аппаратного обеспечения // Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / пер. с англ. под ред. А.А. Власенко, ред. оригинального изд. У. Кестер – М.: Техносфера, 2010. – С. 270–326.
114. Буч, Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений на C++ / Г. Буч; пер. с англ. И. Романовский, Ф. Андреев. – СПб.: Невский диалект, 1998. – 560 с.
115. Sutherland, S. SystemVerilog for Design Second Edition: A Guide to Using SystemVerilog for Hardware Design and Modeling, 2nd edition / S. Sutherland, S. Davidmann, P. Flake, P. Moorby. – NY: Springer, 2006. – 418 p.
116. Голицын, А.А., Механизм ввода поправок в прицельный знак цифровых и тепловизионных прицелов для стрелкового оружия на базе датчика направления магнитного поля / А.А. Голицын // Спецтехника и связь. – 2013. – №1. – С. 15–20.
117. scmRTOS. Операционная система реального времени для однокристальных микроконтроллеров. Version 4 [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://scmrtos.sourceforge.net/files/doc/ru/scmRTOS_v4.ru.pdf
118. CY7C68013 Ez-USB FX2 USB Microcontroller [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.keil.com/dd/docs/datashts/cypress/cy7c68xxx_ds.pdf
119. Di Jasio, L. Asynchronous Communication // Programming 32-bit Microcontrollers in C. Exploring the PIC32 / L. Di Jasio – Burlington, MA: Elsevier Newnes, 2008. – Pp. 197–218.

120. Memory // ADSP-BF533 Blackfin Processor Hardware Reference, Rev. 3.6, Feb. 2013 / Analog Devices, Inc. – USA, Norwood: Analog Devices, 2013. – Pp. 237–312.
121. Questa Advanced Simulator - Mentor Graphics [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.mentor.com/questa>
122. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа– М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
123. Солонина, А.И. Архитектура цифровых процессоров обработки сигналов // Алгоритмы и процессоры цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Улахович, Л.А. Яковлев. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – С. 55–114.
124. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С. Грузман [и др.] – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
125. Борзов, С.М. Цифровая обработка изображения в ИАиЭ СО РАН. Прошлое, настоящее и перспективы / С.М. Борзов [и др.] // История науки и техники. – 2017. – № 5. – С. 102–110.
126. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений. Преобразования и медианные фильтры / под ред. Т.С. Хуанга; пер. с англ. под ред. Л.П. Ярославского. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
127. Прэтт, У., Цифровая обработка изображений в 2-х книгах. Кн. 2 / У. Прэтт; пер. с англ. под ред. Д.С. Лебедева – М.: Мир, 1982. – 480 с.
128. Голицын, А.А. Реализация алгоритма кусочно-линейного изменения контрастности изображения в приборах наблюдения / А.А. Голицын // Труды XXIV международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, г. Москва, 24–27 мая 2016 г. – М.: АО «НПО «Орион», 2016. – С. 194–195.
129. Борзов, С.М. Оценка эффективности нелинейных методов коррекции данных крупноформатных телевизионных ФПУ / С.М. Борзов [и др.] // В сборнике: Труды XXIV Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – 2016. – С. 205–208.
130. Болтарь, К.О. Алгоритмы цифровой обработки тепловизионных изображений в реальном времени на базе сигнальных процессоров «Мультикор» / К.О. Болтарь, Р.В. Грачев, В.В. Полунеев, В.С. Рудневский // Успехи прикладной физики. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 75–81.

131. Brailean, J.C. Noise Reduction Filters for Dynamic Image Sequences: A Review / J.C. Brailean [et al] // Proceedings of IEEE. – Vol. 83. – No. 9. – Pp. 1272–1292.
132. Zemax. Optical and Illumination Design Software [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.zemax.com>
133. Ковалев, А.М. О способе отображения объектов в сферической перспективе / А.М. Ковалев // – Автометрия. – 2000. – № 4. – С. 76–81.
134. Ковалев, А.М. О структуре визуального пространства / А.М. Ковалев // В сборнике Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2007. – Т. 4. – № 1. – С. 24–28.
135. Способ и устройство отображения пространственных объектов: пат. 2143718 Российская Федерация / А.М. Ковалев; заявитель и патентообладатель Институт автоматики и электрометрии СО РАН – заявка № 98109571; заявл. 15.05.1998; опубл. 27.12.1999.
136. Ковалев, А.М. Аберрации в ретинальных дисплеях с виртуальным сферическим экраном / А.М. Ковалев // Автометрия. – 2001. – № 1. – С. 3–14.
137. Light control in head mounted displays: пат. 20120119978 А1 США / J.N. Border, J. Bietry, J.D. Haddick, R.M. Lohse – заявка № 13/357815; опубл. 17.05.2012.
138. Голицын, А.А. О необходимости применения алгоритма сглаживания при электронном увеличении изображения в составе цифровых и тепловизионных прицельных комплексов / А.А. Голицын, М.Ю. Цивинский // Наука. Промышленность. Оборона. 2015: труды конференции, г. Новосибирск, 22–24 апреля 2015 г. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2015. – С. 213–216.
139. Голицын, А.А. Алгоритм сглаживания увеличенного изображения в тракте видеообработки цифрового прибора наблюдения / А.А. Голицын, М.Ю. Цивинский // Прикладная физика. – 2017. – № 4. – С. 46–50.
140. Вельтмандер, П.В. Машинная графика. Основные алгоритмы. Книга 2 / П.В. Вельтмандер – Новосибирск: НГУ, 1997. – 197 с.
141. Федоренко, Р.П. Интерполяция функции // Введение в вычислительную физику: учеб. пособие: для вузов / Р.П. Федоренко – М.: Изд-во Моск. Физ.-техн. ин-та, 1994. – С. 28–48.
142. Бахвалов, Н.С. Интерполяция и численное дифференцирование / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков // Численные методы – М.: Мир, 1987. – С. 35–85.

143. Наставление по стрелковому делу. 7,62-мм снайперская винтовка Драгунова (СВД) – М.: Воениздат, 1984. – 176 с.
144. Мальцев, А.М. Азбука снайпера: учебное пособие / А.М. Мальцев. – М.: Общевойсковая академия Вооруженных Сил РФ, 2000. – 66 с.
145. AS5050 Low Power 10-bit Magnetic Rotary Encoder. Datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://www.ams.com/ger/content/download/383143/1241057/file/AS5050_Datasheet_v1-16.pdf/320895
146. AS5000 Series Magnetic Sensor Circuits. Magnet Selection Guide [Электронный ресурс] – Режим доступа:
<http://www.ams.com/eng/content/view/download/13858>
147. AS5000-MD6H-2 Magnet for Rotary Encoder [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.ams.com/eng/content/download/14907/272250/12031>
148. Генерозов, В.Я. Как научиться метко стрелять пулей: справочник / В.Я. Генерозов. – М.: ИД Рученькиных, 2004. – 48 с.
149. Подготовка снайперов: учебно-методическое пособие / под ред. В.М. Чайки. – М.: Воениздат, 1987. – 168 с.
150. Контрольский, И.П. Основы устройства прицелов наземной артиллерии / И.П. Контрольский. – Пенза, 1967. – 135 с.
151. Солодилов, К.Е. Военные оптико-механические приборы / К.Е. Солодилов. – М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1940. – 262 с.
152. Ultralow Power Digital Accelerometer ADXL346 / Analog Devices [Электронный ресурс] – Режим доступа:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL346.pdf
153. Топорков, А.А. Совершенствование прицельных сеток перспективных и ночных прицелов / А.А. Топорков, И.С. Бутримов // В сборнике Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 5. – № 2. – С. 121–127.
154. Топорков, А.А. Сравнительный анализ сеток ночных прицелов / А.А. Топорков, И.С. Бутримов // В сборнике Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – № 2. – С. 57–63.
155. Прицельные сетки прицелов [Электронный ресурс] – Режим доступа:
forum.guns.ru/forummessage/95/572477.html

156. U.S. OPTICS Reticle Handbook [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.usoptics.com>
157. Изделие 1П61. Техническое описание и инструкция по эксплуатации АЛ5.176.629.ТО – Новосибирск: ПО НПЗ, 1998.
158. Аксенов, В.А. Ствольный коллиматор для выверки оптически прицелов стрелкового оружия «Наметка» (1П61): учебн. пособие по огневой подготовке / В.А. Аксенов [и др.]; под общ. ред. А.А. Столярова – Новосибирск: СТиС, 2000. – 31 с.
159. Бутримов, И.С., Оптико-электронный комплекс для контроля положения линии визирования прицельных устройств в ходе стендовых испытаний / И.С. Бутримов, В.С. Айрапетян // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Т. 33. – № 1. – С. 124–128.
160. EIA-1956 Resolution Test Chart [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://ru.wikipedia.org/wiki/Телевизионная_испытательная_таблица
161. Айрапетян, В.С. Основные аспекты контроля параметров прицельной техники в ходе полигонных испытаний / В.С. Айрапетян, И.С. Бутримов, М.С. Комбаров // В сборнике Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2013. – Т. 5. – № 2. – С. 178–183.
162. Курс стрельб из стрелкового оружия (КС СО-85) – М.: Воениздат, 1987. – 112 с.
163. Наставления по стрелковому делу. Издание 4-е, исправленное / под. ред. В.М. Чайки – М.: Воениздат, 1987. – 640 с.
164. Айрапетян, В.С. Оптико-электронное устройство для контроля параметров прицельной техники в ходе полигонных испытаний / В.С. Айрапетян, И.С. Бутримов // В сборнике Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2014. – Т. 5. – № 2. С. 139–144.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акты о внедрении и использовании научных результатов

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель руководителя
Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ»



 С. М. Чурилов

«30» октября 2017 г.

А К Т

Выдан Голицыну А. А. для предоставления в Диссертационный Совет, свидетельствующий о том, что результаты исследования «Повышение эффективности цифровых оптико-электронных прицелов для стрелкового оружия», 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:

- конструкция окуляра использована при создании тепловизионного прибора наблюдения в рамках выполнения ОКР «Обзор»;
- схема управления ПЗС-фотоприемником и аппаратно-программный комплекс получения и обработки изображений использованы в конструкции телевизионного визирного канала изделия «Ракурс»;
- аппаратно-программный комплекс получения и обработки изображений использован в конструкции стенда, предназначенного для исследования свойств жидколинзовых объективов при выполнении НИР «Эстафета».

Зав. отделом электронных систем



Ю.Л. Кравченко

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
ИАиЭ СО РАН
д.т.н., профессор



О.И. Потатуркин

« 13 » ноября 2017 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы А.А. Голицына
«Повышение эффективности цифровых оптико-электронных
прицелов для стрелкового оружия»

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы А.А. Голицына «Повышение эффективности цифровых оптико-электронных прицелов для стрелкового оружия» использованы в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматике и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН).

При разработке тепловизионных прицелов для стрелкового оружия «Путник-50» и «Путник-100» использовались следующие результаты диссертационной работы А.А. Голицына:

- реализация способа выверки прицельного устройства на оружии;
- реализация метода повышения кучности путем индикации наличия бокового наклона прицельного устройства;
- схемотехнические и программные решения построения тракта обработки видеоизображений.

В рамках выполнения СЧ НИР «Перископ-Н» использованы:

- схема подключения и алгоритм управления ПЗС-фотоприемником;

Заведующий лабораторией
к.т.н.

С.М. Борзов