

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

На правах рукописи



Сейфи Наталья Андреевна

**МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО
ВИДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКА**

Специальность 2.2.6 – 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 – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	13
1.1 Описание предметной области	13
1.2 Препятствия, возникающие при построении активно-импульсной системы без электронно-оптического преобразователя	18
1.3 Особенности ПЗС-фотоприемников со строчным переносом	24
Основные выводы по результатам первой главы	29
ГЛАВА 2 РЕАЛИЗАЦИЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ВИДЕНИЯ НА ПЗС-МАТРИЦЕ СО СТРОЧНЫМ ПЕРЕНОСОМ	30
2.1 Управление ПЗС-матрицей со строчным переносом при реализации метода наблюдения со стробированием	30
2.2 Реализация метода наблюдения со стробированием на основе ПЗС-матрицы в условиях низкой освещенности	38
2.3 Критерии выбора фотоприемника.....	44
Основные результаты второй главы.....	49
ГЛАВА 3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАКЕТА АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ	50
3.1 Конструктивное исполнение.....	50
3.2 Аппаратно-программная реализация макета прибора	57
3.3 Аппаратная реализация алгоритмов управления ПЗС-матрицей	69
3.4 Оценка дальности действия макета разрабатываемой активно-импульсной системы.....	80
Основные результаты третьей главы	83
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ БЕЗ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	85

4.1	Предпосылки проведения экспериментов	85
4.2	Экспериментальная апробация предложенного способа управления ПЗС-матрицей при наблюдении бликующих объектов	86
4.3	Изменение глубины просматриваемой зоны	97
4.4	Улучшение способности обнаружения отражающих объектов	102
4.5	Наблюдение в условиях ограниченной видимости.....	105
4.6	Технические характеристики макета активно-импульсного прибора	108
4.7	Сравнение классических активно-импульсных систем с системами без электронно-оптического преобразователя	112
	Выводы по результатам четвертой главы.....	117
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	119
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	120
	ПРИЛОЖЕНИЕ А ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ	134
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	135

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена созданию малогабаритного цифрового активно-импульсного прибора наблюдения на основе ПЗС-матрицы без использования в его конструкции электронно-оптического преобразователя или иного другого внешнего по отношению к фотоприемнику затвора.

Актуальность темы исследования

Активно-импульсными (АИ) называются приборы наблюдения, принцип действия которых основан на методе стробирования по дальности. Такие приборы имеют в своей конструкции синхронизированные друг с другом фотоприемник и импульсный излучатель, используемый для подсветки сцены [1–5].

Суть метода заключается в том, что фотоприемник начинает получать изображение с некоторой задержкой относительно срабатывания излучателя, благодаря чему воспринимает свет излучателя, отраженный только от интересующих оператора объектов, отсекая при этом свет, отраженный от объектов, находящихся ближе заданного расстояния, например, от частиц пыли или тумана, расположенных между наблюдателем и интересующим наблюдателя объектом [6].

Такие устройства также могут применяться для наблюдения в условиях ограниченной видимости при задымлении, в тумане, а также при наличии встречной засветки [7–11]. В последнее время активно-импульсные системы, основанные на методе стробирования, получили широкое распространение в задачах дистанционного обнаружения оптической и оптико-электронной аппаратуры, осуществляющей направленное встречное наблюдение [12–15].

Подобные приборы могут быть применены при проведении поисковых, спасательных и контртеррористических мероприятий в условиях неблагоприятной видимости, поэтому их усовершенствование за счет применения новых научно-технических решений безусловно является актуальным [16, 17].

Кроме того, разработка устройств наблюдения с использованием новых принципов или способов получения изображения, в том тех, в основе которых

лежит активно-импульсный метод наблюдения, признана одним из актуальных направлений развития современной радиотехники и фотоэлектроники [18]. На сегодня мировой рынок электроники и оптико-электронной техники занимает одно из ведущих мест в ряду высоких технологий. Причиной высокого темпа развития является постоянное совершенствование радиоэлектронной элементной базы, что, в свою очередь, позволяет реализовывать новые схемотехнические решения в устройствах получения и обработки изображений.

Степень разработанности темы исследования

Основоположником АИ-систем является академик А.А. Лебедев, предложивший метод наблюдения с пространственной селекцией в оптические устройства по аналогии с радиолокаторами в 1936 г. [19, 20]. За рубежом такой способ стал изучаться в 1960е годы и получил наименование «Range gated imaging» [21–25]. В частности, вклад в исследование метода внесли D.V. Neumann, L.F. Gillespie и другие ученые. В 60-е года XX века активно-импульсные устройства получили развитие с появлением новых электронно-оптических преобразователей и импульсных лазеров [26–28].

С развитием элементной базы микроэлектроники и появлением электронно-оптических преобразователей новых поколений активно-импульсные системы получили развитие в 80–90е годы XX века. Появилось множество публикаций и патентов, метод стал описываться в учебниках [29–33].

В России и странах СНГ разработкой АИ-приборов и изучением их свойств в разное время занимались В. Г. Волков, И. Л. Гейхман, А. В. Голицын, П. А. Дегтярев, В. Е. Карасик, Ю.Р. Кирпиченко, В. И. Креопалов, Б. Ф. Кунцевич, А. А. Манцветов, И. Н. Пустынский, В. В. Тарасов, А. К. Цицулин, В. Б. Шлишевский, Ю. Г. Якушенков и некоторые другие ученые. За рубежом – L. F. Gillespie, H. Heiselberg, M. Laurenzis, D. V. Neumann, P. Mariani, X. Ren, S. Y. Chua, X. Wang.

В настоящее время исследование метода активно-импульсного видения и разработка устройств на его основе ведется в таких организациях, как АО

«Научно-исследовательский институт телевидения», АО «Швабе-Фотоприбор», Нижегородский государственный технический университет, Институт физики НАН Беларуси, НПП «Талос», Новосибирский приборостроительный завод, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Институт физики полупроводников СО РАН.

За рубежом аналогичные исследования проводятся в Technical University of Denmark (Дания), National Sun Yat-sen University (Китай), Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (Германия), Swedish Defence Research Agency (Швеция), Xi'an Institute of Applied Optics (Китай), Quantum Optics Research Division (Южная Корея) и в некоторых других коммерческих организациях, научных и образовательных учреждениях.

Существующие активно-импульсные приборы наблюдения обладают одним и тем же «слабым звеном» – электронно-оптическим преобразователем (ЭОП), выполняющим функции быстродействующего затвора. Главным недостатком ЭОП является то, что в конструкции цифрового прибора наблюдения он используется совместно с оптической проекционной системой, необходимой для его согласования с последующим устройством получения изображения (обычно на основе КМОП- или ПЗС-матрицы), а это значительно увеличивает габаритные размеры и массу всего прибора, что, в свою очередь, является критическим при построении приборов наблюдения двойного и специального назначения.

Другими недостатками использования ЭОП являются ограниченная разрешающая способность ЭОП по сравнению с КМОП- и ПЗС-фотоприемниками большого разрешения и невозможность наблюдения цветного изображения. Также немаловажно то, что ЭОП вместе с проекционной системой вносят значительный вклад в себестоимость оптико-электронного прибора.

Цель и задачи работы

Целью работы является увеличение разрешающей способности активно-импульсных приборов наблюдения и систем лазерной локации, а также снижение их массогабаритных характеристик.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Создать стенд и выполнить на нем исследование явлений и процессов, позволяющих реализовать метод наблюдения со стробированием на основе матричных фотоприемников видимого диапазона без использования внешнего затвора.

2. Разработать алгоритмы управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом синхронно с импульсным лазерным излучателем, реализующие метод стробирования по дальности в условиях нормальной освещенности и в условиях пониженной освещенности.

3. Осуществить практическую реализацию разработанных алгоритмов.

Научная новизна:

1. Доказана возможность увеличения времени экспозиции итогового кадра изображения путем поэлементного суммирования в зарядовом виде отдельных изображений, полученных путем стробирования, непосредственно на ПЗС-матрице до их оцифровки.

2. Предложен способ управления ПЗС-фотоприемником в нестандартном режиме, позволяющий исключить из конструкции прибора электронно-оптический преобразователь.

3. Разработаны алгоритмы управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом синхронно с импульсным лазерным излучателем, позволяющие реализовать метод стробирования по дальности в условиях нормальной и пониженной освещенности.

Положения, выносимые на защиту:

1. При реализации активно-импульсного видения путем использования функции электронного затвора фотоприемника, суммирование нескольких отдельных кадров изображения, полученных в том числе с малой экспозицией до 1 мкс при длительности импульса лазерного излучателя 100–150 нс, до их оцифровки позволяет получать изображения наблюдаемой сцены в реальном времени с кадровой частотой не менее 25 кадров/с с отчетливо различимыми деталями фона и наблюдаемых объектов без использования усилителя яркости.

2. Многократное перемещение зарядов из фоточувствительной секции ПЗС-фотоприемника со строчным переносом в секцию вертикального переноса и последующий вертикальный перенос, осуществляемый один раз после всех перемещений, а не между ними, позволяет использовать секцию вертикального переноса в качестве дополнительной секции накопления зарядов и суммировать в ней несколько отдельных кадров изображения до их оцифровки.

3. Алгоритмы управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом синхронно с импульсным лазерным излучателем, реализующие метод стробирования по дальности в условиях нормальной и пониженной освещенностей.

Объект и предмет исследования

Объектами исследования являются стандартные ПЗС-фотоприемники со строчным переносом, изначально для использования в составе активно-импульсных систем не предназначенные. Предметом исследования является методика управления указанными ПЗС-фотоприемниками.

Методология и методы исследования

При разработке схем и конструкций оптико-электронных модулей цифрового активно-импульсного прибора наблюдения использовались известные методы композиции оптических и электронных систем, основанные на расчетах

параметров как отдельных блоков, так и оптико-электронной системы в целом, с последующей апробацией полученных результатов на практике.

При разработке основных элементов активно-импульсного устройства 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.

Степень достоверности

Достоверность результатов исследования обеспечена использованием современных систем проектирования и разработки радиоэлектронных систем с использованием средств автоматизированного проектирования, хорошей согласованностью теоретических данных с экспериментальными данными, а также достаточным объемом полученных результатов. Исследование проведено как на теоретическом, так и на практическом уровнях методами, соответствующими предмету, цели и поставленным задачам.

По теме данной диссертационной работы опубликованы статьи в ведущих рецензируемых изданиях, в том числе индексируемых в реферативных базах Scopus и Web of Science Core Collection.

Теоретическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в разработке способов управления ПЗС-фотоприемниками со строчным переносом, обеспечивающих возможность их применения в составе активно-импульсных приборов наблюдения, и в разработке новых оптико-электронных схем, позволяющих реализовать на их основе активно-импульсную систему без использования ЭОП.

Практическая значимость работы

Практическая значимость работы состоит в разработке алгоритмов управления ПЗС-фотоприемниками со очным переносом, реализующих метод наблюдения со стробированием, и в последующем применении результатов исследования при создании перспективных цифровых активно-импульсных приборов наблюдения видимого диапазона в условиях ограниченной видимости и устройств категории «Антиснайпер».

В результате работы разработан прототип цифрового активно-импульсного устройства, предназначенного для наблюдения в условиях ограниченной видимости, не содержащий в своей конструкции электронно-оптический преобразователь ни в виде отдельного элемента, ни в составе гибридного фотоприемника, сочлененного с усилителем яркости.

Результаты работы позволяют упростить конструкцию АИ-приборов, уменьшить их массогабаритные характеристики и снизить их себестоимость.

Реализация результатов работы

Результаты работы использованы в научно-технической деятельности ФГУП «ГосНИИПП», г. Санкт-Петербург (Приложение Б).

Личный вклад

Все основные результаты работы, ее выводы и защищаемые положения получены автором лично. Подготовка результатов к публикации велась вместе с соавторами. Общий вклад в написание опубликованных статей составляет не менее 75%. Кроме того, автором самостоятельно были поставлены задачи исследования, сформулирована цель, сформулировано техническое задание на лабораторный стенд для исследования возможностей ПЗС-матриц. Автором была осуществлена сборка стенда, проведены необходимые эксперименты, а также была осуществлена обработка результатов экспериментов и последующая интерпретация полученных данных.

Апробация работы

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

- Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука, технологии, инновации» (г. Новосибирск, 2010, 2011);

- Молодежная конкурс-конференция «Фотоника и оптические технологии» (г. Новосибирск, 2011 и 2012);

- XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (г. Томск, 2011);

- Siberian innovative technologies Graduate and postgraduate students' scientific conference (г. Новосибирск, 2011);

- XIX Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (г. Архангельск, 2013);

- Всероссийская научно-техническая конференция «Наука. Промышленность. Оборона» (г. Новосибирск, 2016 и 2017);

- Одиннадцатая Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы обеспечения взрывобезопасности и противодействия терроризму» (г. Санкт-Петербург, 2016);

- XII Международный научный конгресс «Гео-Сибирь» (г. Новосибирск, 2016); XXIII Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых (г. Екатеринбург, 2017);

- 14th International Scientific-Technical Conference APEIE, (г. Новосибирск, 2018);

- 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (респ. Алтай, 2019).

- 21th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (г. Новосибирск, 2020).

Публикации

По результатам проведенного исследования в рамках настоящей работы автором опубликовано 23 печатных работы. Из них 6 работ опубликовано в журналах, входящих в перечень ВАК, 6 статей проиндексированы в реферативной базе Scopus, 4 – в Web of Science Core Collection. Автором получен 1 патент Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 132 наименований, одного приложения. Объем диссертационной работы – 135 страниц, в том числе рисунков – 52, таблиц – 4.

ГЛАВА 1 ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В данной главе рассматриваются вопросы построения визирной части активно-импульсного прибора наблюдения на основе твердотельного матричного фотоприемника без использования электронно-оптического преобразователя (ЭОП) в качестве внешнего затвора. Приводятся требования, предъявляемые к используемому фотоприемнику. Описываются особенности конструкции ПЗС-фотоприемников со строчным переносом.

1.1 Описание предметной области

Активно-импульсными приборами наблюдения называются устройства, принцип действия которых основан на методе, предложенном академиком А. А. Лебедевым в 1936 г. Суть метода заключается в том, что осматриваемая местность подсвечивается короткими импульсами, длительность которых существенно меньше времени, затрачиваемого на прохождение светом расстояния до объектов наблюдения и обратно. Фотоприемное устройство управляется синхронно со световым излучателем и начинает воспринимать свет с некоторой задержкой, относительно срабатывания излучателя. Задержка необходима для того, чтобы не пропустить свет, вернувшийся с меньшего, по сравнению с заданным, расстояния, то есть тот свет, который вернулся быстрее [1–5].

Благодаря задержке фотоприемное устройство воспринимает свет излучателя, отраженный только от интересующих оператора объектов, отсекая свет, от частиц пыли или тумана, расположенных между наблюдателем и интересующим наблюдателя объектом [6–10]. Иными словами, она позволяет оператору наблюдать сквозь препятствие в виде частиц в атмосфере и не слепить себя своей собственной подсветкой.

В качестве пояснения процесс схематично представлен на рис. 1. На нем показано, что при излучении короткого импульса света (в момент времени t_0) сначала назад вернется часть света подсветки, отраженная от частиц в атмосфере

(1) – (4), которые находятся ближе объекта наблюдения (в моменты времени t_1 – t_4), и лишь затем (в момент времени t_5) вернется свет, отраженный от объекта наблюдения (5). Кроме того, через некоторое время t_6 вернется свет, который отразится от предметов (6), расположенных дальше объекта наблюдения.

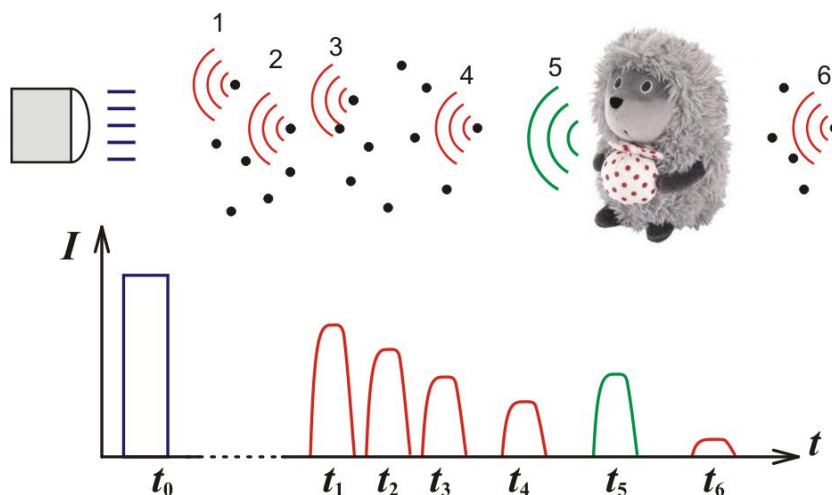


Рисунок 1 – Иллюстрация метода наблюдения со стробированием

Если фотоприемник прибора наблюдения воспримет весь отраженный свет, то изображение объекта окажется зашумленным изображениями частиц. Но если фотоприемник воспримет только свет, вернувшийся в момент времени t_5 , а остальной свет окажется отфильтрованным, то наблюдатель увидит качественное не загроможденное изображение, интересующего его объекта .

Метод стал активно изучаться с 1960-х годов после появления импульсных лазеров, примерно в это же время он стал описываться в зарубежной литературе [21–25]. Такой метод наблюдения применяется не только для наблюдений сквозь дым или туман, но также в устройствах дистанционного обнаружения оптических и оптико-электронных средств, ведущих встречное наблюдение [10, 28–33]. Их принцип действия основан на том, что при подсветке местности зондирующим излучением в местах нахождения оптических устройств наблюдается блик.

Другими областями применения активно-импульсных систем является определение расположения объектов на местности или в пространстве по принципу радара [34–38], измерение расстояний до объектов [39–41], построение объемных изображений путем «сканирования» срезов [42–46] и наблюдение за объектами через мутные среды, например, под водой [47–57].

Одним из основных элементов конструкции активно-импульсных приборов и систем является быстродействующий затвор, полностью открывающий или полностью закрывающий фотоприемник с точностью до десятков наносекунд. Традиционно в качестве затвора, который обеспечивает синхронизацию фотоприемника с импульсным лазерным излучателем, используется электронно-оптический преобразователь (ЭОП) [14, 33], одновременно выполняющий функции и быстродействующего затвора, и усилителя яркости. Типовая структурная схема такого прибора представлена на рис. 2.

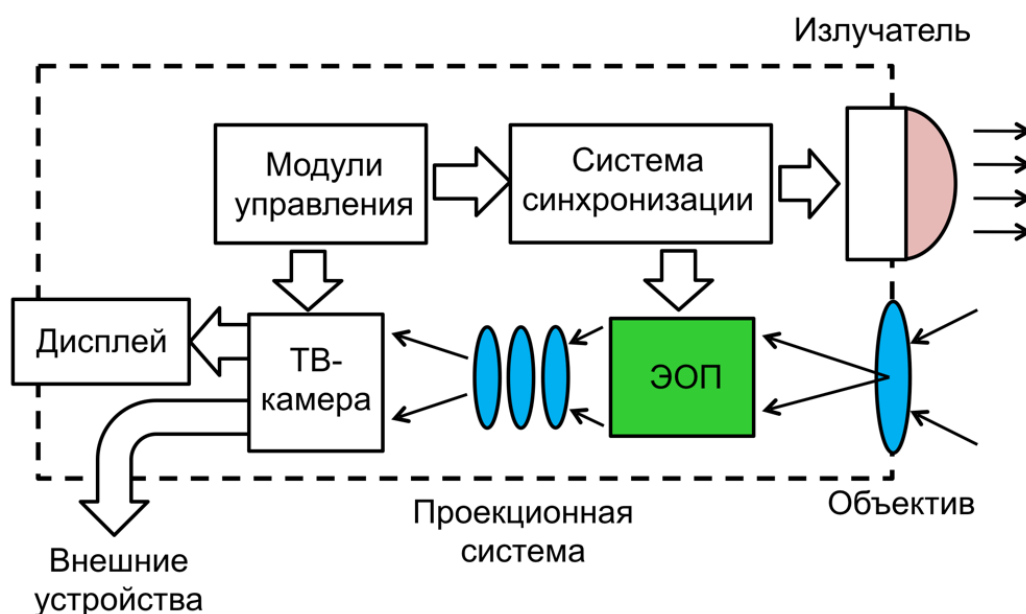


Рисунок 2 – Структурная схема активно-импульсного прибора на ЭОП

Вместе с тем, существует несколько причин отказаться от использования быстродействующего затвора, реализованного на ЭОП. Основной из них является необходимость уменьшения массы и габаритных размеров активно-импульсного прибора наблюдения, что может быть достигнуто исключением из конструкции устройства как самого ЭОП, так и необходимой для его согласования с фотоприемником проекционной оптической системы (рис. 2).

Другими причинами являются необходимость увеличения разрешения наблюдаемого изображения, ограничиваемого ЭОП, необходимость минимизации искажений преобразования изображения с ЭОП на регистрирующий фотоприемник [58], необходимость наблюдения цветного изображения, а также

необходимость повышения надежности всей системы и одновременного уменьшения ее себестоимости.

Даже беглый осмотр конструкций современных активно-импульсных систем и приборов наблюдения показывает, что ЭОП и проекционная схема занимают большую часть внутреннего пространства прибора независимо от целей его применения и дальности действия. Кроме того, ЭОП и проекционная схема являются наиболее дорогостоящими деталями. На рис. 3 наглядно продемонстрировано, какую часть объема они занимают в приборах наблюдения и в устройствах лазерной локации.



а



б

Рисунок 3 – а) внутренний вид отечественного активно-импульсного прибора на основе ЭОП. б) прибор разработки Infiniti Electro-Optics (Канада)

На рис. 4 и 5 видно, какой объем занимают приборы по сравнению с размерами их входных объективов.



Рисунок 4 – Активно-импульсный прибор [59] разработки Invisible Vision (Великобритания)

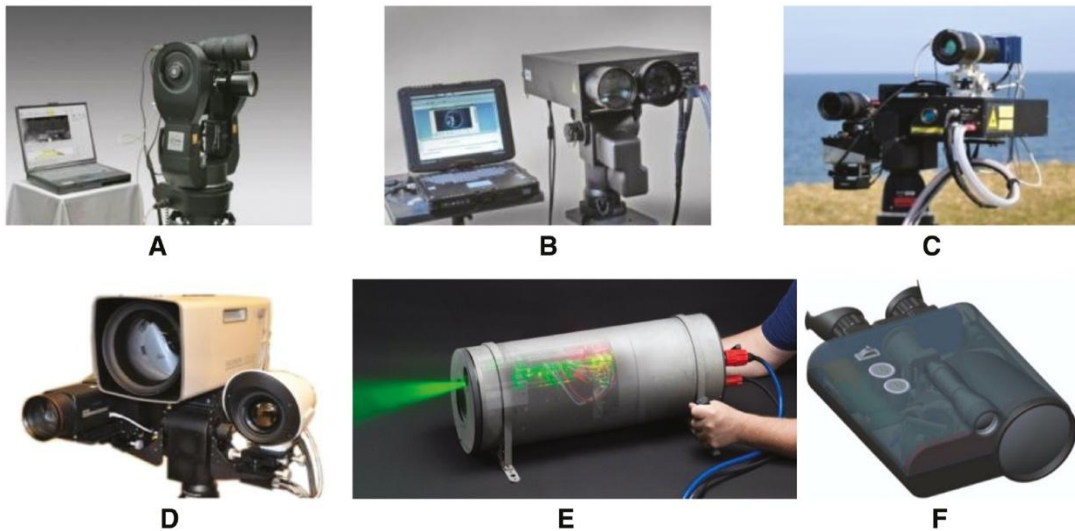


Рисунок 5 – Активно-импульсные приборы [60]: А) французский военный прибор на основе 808 нм лазера; В) прибор наблюдения на основе безопасного лазера 1574 нм (Франция); С) прибор, предназначенный для обнаружения беспилотных летательных аппаратов; D) прибор наблюдения на дальние дистанции (до 20 км); E) устройство подводного видения на основе зеленого лазера 532 нм (Германия); F) носимый активно-импульсный прибор наблюдения

Проекционная система может быть исключена при использовании гибридных (сочлененных, комплексированных) с ЭОП фотоприемников [61–64]. Пример реализации активно-импульсного устройства на основе такого фотоприемника приведен в работе [65]. Так называемые ПЗС-матрицы с усилением (англ. *Intensified CCD*) обладают меньшими габаритами по сравнению с системой «отдельный ЭОП – проекционная система – отдельная ПЗС- или КМОП-матрица», но большими по сравнению с отдельной ПЗС- или КМОП-матрицей. При этом они не лишены остальных вышеперечисленных недостатков использования ЭОП, к которым добавляются их низкая доступность приобретения указанных фотоприемников из-за малой серийности и их высокая стоимость по сравнению с отдельно взятыми ЭОП и твердотельным фотоприемником.

1.2 Препятствия, возникающие при построении активно-импульсной системы без электронно-оптического преобразователя

Используемый в конструкции активно-импульсных приборов ЭОП решает две задачи – осуществляет синхронизацию фотоприемника с излучателем и увеличивает яркость наблюдаемого изображения. Таким образом, для исключения ЭОП необходимо, чтобы эти задачи решались самим фотоприемником.

Многие современные ПЗС- и КМОП-фотоприемники обладают функцией «электронного затвора», которая используется для управления временем экспозиции. Как таковой затвор в конструкции фотоприемников отсутствует – управляющие сигналы фотоприемника позволяют лишь менять время от принудительного стирания накопленных зарядов до момента считывания их оцифровывающей системой, но не закрывать фотоприемник от поступающего на него потока излучения.

Используя функцию электронного затвора, можно синхронизировать фотоприемник и импульсный излучатель, и тем самым отсечь свет, отраженный от предметов, находящихся ближе заданного расстояния, как показано на рис. 6.

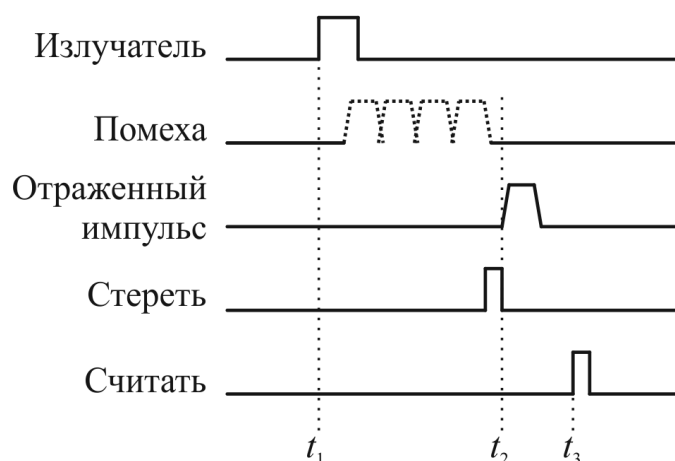


Рисунок 6 – Синхронизация фотоприемника с излучателем.

На рисунке обозначены следующие сигналы:

Излучатель – сигнал, управляющий излучателем;

Помеха – импульсы подсветки, отраженные от объектов, находящихся ближе заданного расстояния (пыль, туман, снег), и представляющие собой помеху;

Отраженный импульс – импульс подсветки, отраженный от объекта, интересующего наблюдателя;

Стереть – сигнал обнуления фотоприемника;

Считать – сигнал, по которому осуществляется считывание полученного кадра изображения.

Промежуток времени от t_1 до t_2 является временем, затрачиваемым светом на прохождение расстояния от прибора наблюдения до наблюдаемого объекта и обратно, а промежуток от t_2 до t_3 – это время экспозиции фотоприемника. Подобный метод фильтрации возвращающегося раньше заданного времени отраженного света, в частности, описан в работе [66].

Таким образом, при исключении из конструкции активно-импульсной системы ЭОП, выполняемая им первая задача – синхронизация фотоприемника с излучателем – может быть решена самим фотоприемником. Вторая задача – увеличение интенсивности получаемого фотоприемником отраженного светового потока при синхронизации фотоприемника с излучателем указанным способом – оказывается не решенной.

Экспериментально была выявлена проблема, заключающаяся в недостаточности мощности единичного импульса подсветки [2]. Дело в том, что «электронный затвор» фотоприемника, при управлении им в соответствии с рис. 6, позволяет только синхронизировать фотоприемник с излучателем, но не обеспечивает возможности наблюдения откликов нескольких импульсов подсветки в одном кадре.

Для пояснения приведем пример. При наблюдении откликов нескольких импульсов между сигналами *Стереть* и *Считать*, как показано на рис. 7, из всех импульсов синхронизованным оказывается только первый, а вместе со вторым, третьим и остальными откликами лазерного излучения на фотоприемник поступает свет, отраженный не только от объекта наблюдения, а вообще ото всех объектов, расположенных на всей протяженности от наблюдателя до объекта наблюдения, что является неприемлемым.

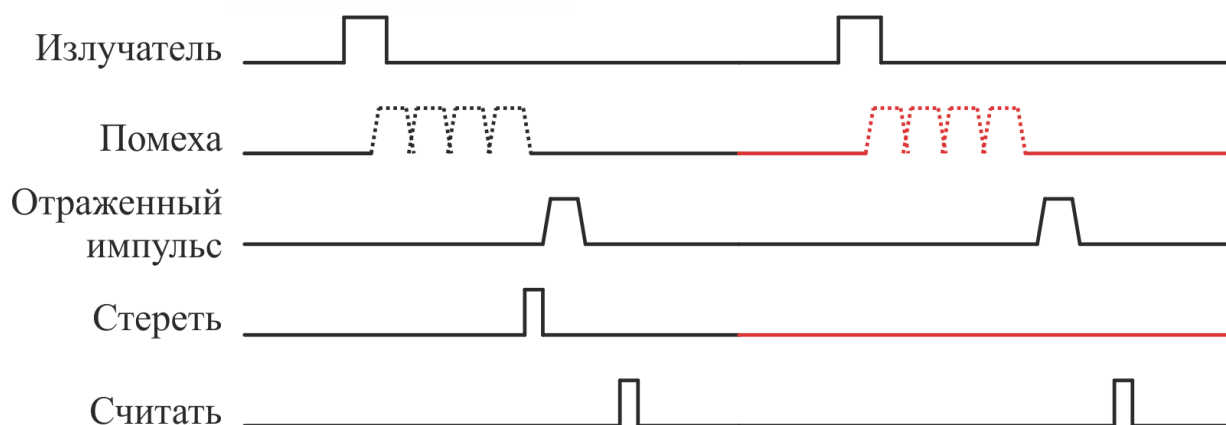


Рисунок 7 – Однократное использование сигнала *Стереть*. Красным цветом обозначена не отфильтрованная помеха

Многократное использование сигнала *Стереть*, синхронизованного с каждым импульсом подсветки, также не дает положительных результатов. В этом случае каждый сигнал *Стереть* обнуляет вообще всю информацию, накопленную до его срабатывания, в том числе полезную информацию, полученную в момент наблюдения отклика от предыдущего импульса излучателя, если она не была заранее считана (рис. 8).

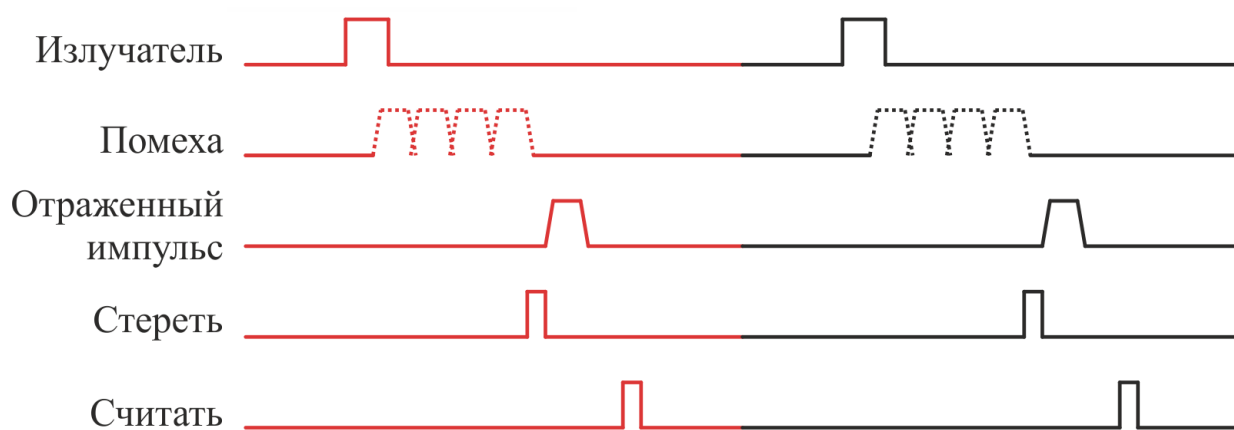


Рисунок 8 – Многократное применение импульса *Стереть* при однократном импульсе *Считать*. Красным цветом обозначена теряемая часть.

Альтернативой является наблюдение нескольких откликов отдельными кадрами с последующим их суммированием. На специально спроектированном для этих целей стенде [67], конструкция которого подробно описана в [68] и в главе 3 настоящей диссертации, а функциональное описание приведено в работе [69], позволяющем подавать на управляющие входы фотоприемника сигналы произвольной формы, был проведен ряд экспериментов, которые также не привели к положительному результату даже в ущерб итоговой кадровой частоты прибора.

Дело в том, что длительность импульса подсветки (около 100...150 нс) мала по сравнению с необходимым временем экспозиции для получения изображения сцены достаточного качества. При таком времени экспозиции уровни полезного сигнала каждого пикселя изображения на выходе фотоприемника не превышают уровня квантования АЦП и собственных шумов фотоприемника.

Время экспозиции каждого кадра может быть увеличено путем увеличения времени t_3 между наблюдением отклика импульса излучателя и импульсом *Считать* (рис. 6), и этом случае можно добиться наблюдения относительно качественного изображения фона, но за счет соотношения времени экспозиции к длительности импульса подсветки освещенность фона маскирует импульс.

В свою очередь, длительность импульса подсветки не может быть увеличена, так как она должна быть существенно меньше времени

распространения света от наблюдателя до наблюдаемых объектов и обратно. В противном случае неизбежно возникнет ситуация, что «хвост» импульса подсветки все еще отражается от частиц в воздухе, а «фронт» уже возвращается, отразившись от объектов, которые представляют интерес для наблюдателя. То есть изображения сольются, и помеха в виде частиц в атмосфере окажется не отфильтрованной.

Общий вывод из описанного выше – синхронизировать фотоприемник с импульсным излучателем технически возможно, но необходимо научиться наблюдать несколько отраженных импульсов подсветки лазерного излучателя в одном кадре.

Дальнейшие эксперименты на стенде [68] показали, что для реализации задуманной идеи существующие в настоящее время КМОП-фотоприемники являются не пригодными, так как их конструкция изначально не предполагает использования нескольких сигналов считывания в одном кадре, а каждый последующий сигнал *Считать* формирует отдельный новый кадр.

Для построения именно активно-импульсного прибора наблюдения, реализующего метод стробирования по дальности без ЭОП, необходим такой фотоприемник, который позволяет суммировать фактически отдельные кадры изображения, но до их оцифровывания.

В литературе встречается и другое решение – применение специализированных быстродействующих высокочувствительных КМОП-матриц [70, 71]. Но подобные фотоприемники не предназначены для использования в «обычных» системах видеонаблюдения, а потому труднодоступны на рынке радиоэлектронных комплектующих и, помимо прочего, имеют цену, сопоставимую со стоимостью ЭОП и даже превышающую ее.

Кроме того, высокоскоростные системы видеонаблюдения требуют наличия большого объема оперативной памяти, необходимой для хранения промежуточных кадров изображения до их слияния, и наличия высокопроизводительного процессора, обеспечивающего суммирование сохраненных кадров, что также усложняет активно-импульсную систему.

Системы на основе указанных КМОП-матриц и им подобных демонстрируют свою работоспособность исключительно в лабораторных условиях и на научном оборудовании. При этом, публикаций об их практическом применении в полевых условиях и на дальностях более 20 метров обнаружено не было, что, по всей видимости, связано с падением интенсивности лазерного излучения с увеличением дальности. То есть для наблюдения на малые расстояния времени экспозиции одного кадра оказывается достаточно, а при наблюдении на дальние расстояния – уже нет. На выставках оптико-электронной техники и специальных средств такие приборы тоже не демонстрировались.

Как будет показано далее в разделе 1.3 диссертации, среди именно «стандартных» и общедоступных фотоприемников подходящими для использования в составе активно-импульсных систем наблюдения являются ПЗС-матрицы со строчным переносом, в англоязычной терминологии называемые *Interline Transfer CCD*. Подходящими они являются из-за своих конструктивных особенностей.

Помимо ПЗС-матриц со строчным переносом существуют еще ПЗС-фотоприемники с кадровым переносом (*англ. Frame transfer CCD*) и полнокадровые ПЗС-матрицы (*англ. Full-frame CCD*) [72, 73]. Но ни те, ни другие не удовлетворяют требованиям возможности объединения (поэлементного суммирования) нескольких кадров до их оцифровки, и, более того, требуют наличия в конструкции прибора наблюдения механического или любого другого внешнего по отношению к ПЗС-фотоприемнику затвора. По последней причине они также не могут быть использованы в конструкции активно-импульсных приборов наблюдения или лазерных локационных систем, построенных без использования ЭОП.

1.3 Особенности ПЗС-фотоприемников со строчным переносом

Большинство современных ПЗС-матриц со строчным переносом имеют похожую структуру, упрощенное изображение которой представлено на рис. 9.

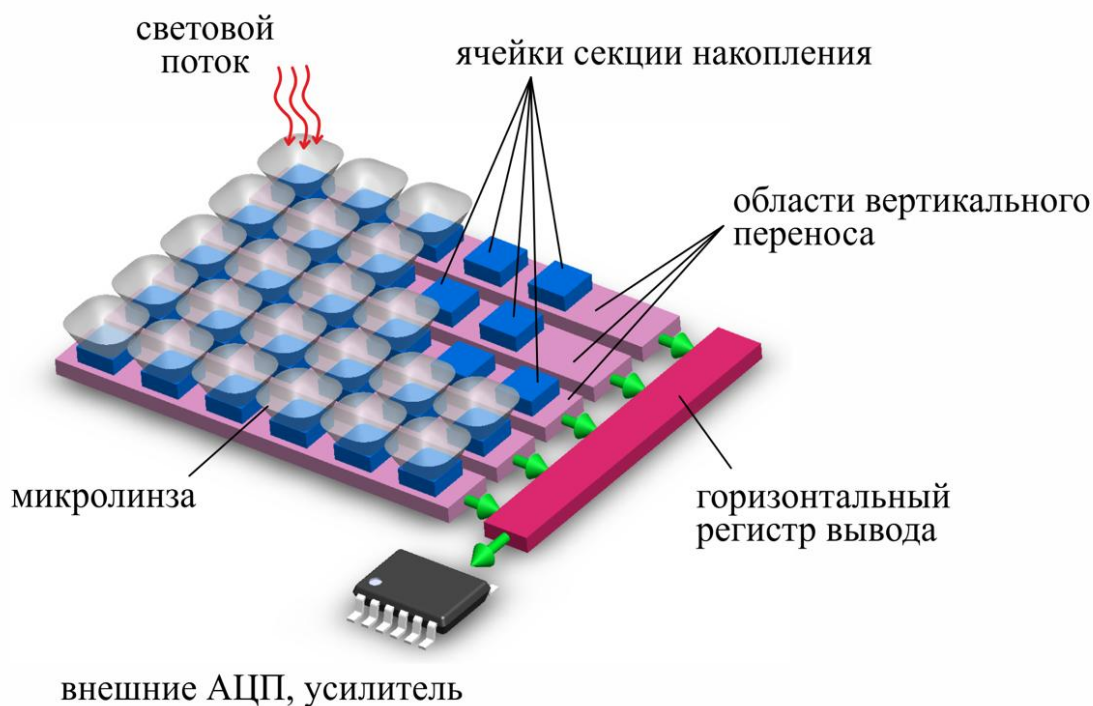


Рисунок 9 – Типовая структура матричного ПЗС-фотоприемника со строчным переносом [74]

В их составе имеется две секции: *секция накопления* и *секция переноса*. Секция накопления состоит из отдельных ячеек – пикселей, в которых благодаря фотоэлектрическому эффекту при попадании света на поверхность матрицы накапливаются заряды [75]. Чем интенсивнее световой поток, в течение некоторого времени приходящий на конкретный пиксель, тем больший заряд в нем за это время накапливается.

Накопленные заряды могут быть обнулены с помощью сигнала сброса либо перемещены в секцию переноса путем подачи соответствующих управляющих потенциалов. Порядок подачи потенциалов, а также их величины определяются производителем конкретного фотоприемника и описаны в документации на него. Отдельно следует указать, что обычно в документации на ПЗС-матрицы сигнал сброса называется *SUB* или *Substrate*, но для большей однозначности и

соответствия названия функциональному назначению мы его обозначим как *Стереть*, так как этот сигнал аналогичен условному сигналу *Стереть*, описанному в разделе 1.2.

Секция переноса используется для последовательной безопасной передачи зарядов на выход фотоприемника. Иногда в литературе эту секцию называют *буферной секцией* или *секцией хранения*, так как она изолирована от поверхности фотоприемника, и во время экспозиции величины зарядов в ее ячейках не изменяются.

Отличительной особенностью ПЗС-фотоприемников со строчным переносом является то, что заряды из секции накопления в секцию переноса перемещаются во всех ячейках одновременно, в отличие от ПЗС-фотоприемников с кадровым переносом [75]. В дальнейшем для краткости мы будем писать *ПЗС-матрица* или *ПЗС-фотоприемник*, но подразумевать под ними будем именно ПЗС-фотоприемник со строчным переносом.

Секция переноса ПЗС-фотоприемника, она же секция хранения, состоит из *горизонтального регистра вывода* и *области вертикального переноса* зарядов. Горизонтальный регистр вывода необходим для поочередного вывода значений пикселей строки на внешние устройства (АЦП, усилитель или ПЗС-процессор), а область вертикального переноса зарядов предназначена для поочередной передачи строк изображения в горизонтальный регистр вывода.

Последовательность получения кадра изображения такая. В начальный момент времени в секции накопления заряды отсутствуют. Через некоторое время, называемое временем экспозиции, накопившиеся заряды из ячеек секции накопления необходимо переместить в ячейки области вертикального переноса (буферной секции). Для этого на часть ячеек области вертикального переноса подается положительный потенциал, обычно величиной около +10...+15 В, под действием которого заряды из ячеек секции накопления переходят в ячейки буферной секции. Как только положительный потенциал перестает подаваться, в ячейках секции накопления вновь начинают накапливаться заряды, уже нового независимого кадра.

Затем происходит поочередная подача и снятие отрицательных потенциалов на ячейки области вертикального переноса в определенном порядке, чтобы заряды перемещались из одной ячейки в другую.

Для управления временем экспозиции и с целью защиты от перенасыщения на секцию накопления ПЗС-матрицы может подаваться управляющий потенциал, обычно амплитудой от +20 до +25 В, обеспечивающий обнуление накопленных зарядов. Соответственно, время экспозиции кадра изображения равняется времени от последнего импульса стирания до импульса, обеспечивающего перемещение зарядов в буферную секцию. Как уже было упомянуто выше, чаще всего в документации производителя этот импульс обозначается как SUB.

Количество потенциалов, управляющих движением зарядов в области вертикального переноса, их численные величины и порядок их поступления на управляющие входы отличаются у ПЗС-матриц различных производителей. Диаграммы управляющих сигналов, их форма и значения напряжений обычно приводятся в документации и руководствах по использованию.

В качестве примера на рис. 10 приведены диаграммы сигналов управления вертикальным переносом ПЗС-фотоприемника ICX618 производства Sony в соответствии с его технической спецификацией [76].

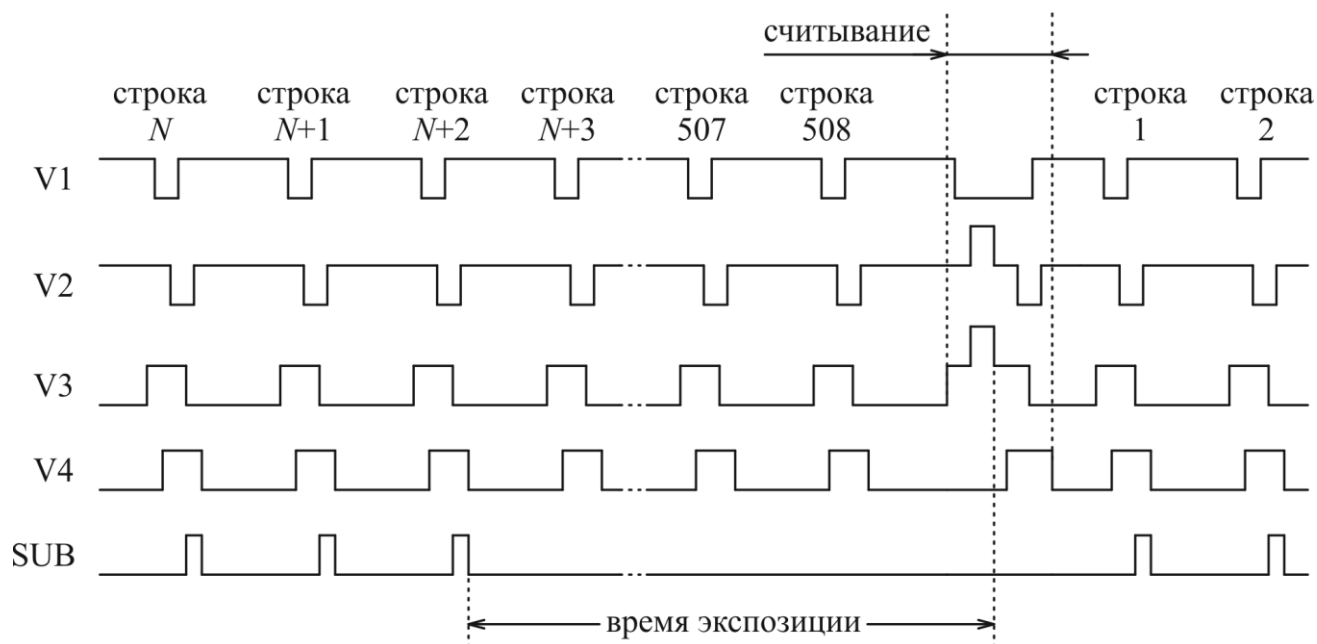


Рисунок 10 – Диаграммы управления ПЗС-фотоприемником Sony ICX618.

Пояснения в тексте

Для наглядности масштаб на приведенных диаграммах не соблюден. В реальной системе времена между вертикальными переносами каждой строки, необходимые для горизонтального переноса, существенно превышают времена вертикальных переносов.

При общем количестве необходимых для вертикального перемещения строк ПЗС-матрицы равном 508, из которых 494 эффективных, 10 темновых и 4 пустых, накопление изображения (экспозиция кадра) осуществляется в моменты вертикального переноса со строки номер $(N+2)$ по последнюю 508-ую перемещаемую строку.

Отдельно на диаграммах отмечен момент переноса зарядов из секции накопления в область вертикального переноса (в буферную секцию), обозначенный для наглядности как *Считывание*.

С соответствия с документацией [76], значения напряжений на входах ПЗС-матрицы V1...V4 в моменты вертикального переноса, в зависимости от конкретной фазы, составляют $-5,5$ В, либо 0 В. В момент считывания напряжения V2 и V3 составляют +15 В. Напряжение сигнала на входе SUB принимает значения 0 В или +20 В.

Диаграммы управления большинством ПЗС-матриц похожи на диаграммы, представленные на рис. 10, с незначительными отличиями для разных моделей фотоприемников.

Само собой, различным фотоприемникам требуются различные значения отрицательных напряжений управляющих сигналов V1...V4. Например, положительные потенциалы в момент считывания могут подаваться на другие выводы по сравнению с матрицей ICX618. Все зависит от конкретного фотоприемника и описано в технической спецификации на него. В частности, матрице Sony ICX659 [77] положительный потенциал +15 В подается на входы V1 и V3, а ПЗС-матрицам серии ICX445 [78] помимо сигналов управления вертикальным переносом V1...V4 для полноценной работы требуются еще дополнительные сигналы управления VHLD и VST.

Дело в том, что матрицы ICX445 могут управляться в режиме «центрального окна», когда на внешние элементы выводятся не все пиксели изображения, а только пиксели заранее выбранного фрагмента кадра. Это значительно ускоряет вывод изображения за счет пропуска «лишних» строк.

Также существуют ПЗС-фотоприемники, имеющие несколько горизонтальных регистров вывода, что предусмотрено в целях повышения скорости считывания кадров изображения. Типичным примером такого фотоприемника является ПЗС-матрица КАІ-47051 производства On Semiconductor [79], данные с которой считываются одновременно по 16 каналам. Такие матрицы имеют большее число входов для управляющих вертикальным переносом сигналов, число которых кратно числу каналов вывода данных.

Но не смотря на указанные различия все ПЗС-матрицы со строчным переносом объединяет одно их общее свойство. Особенностью всех ПЗС-матриц со строчным переносом, является то, что управляющий сигнал сброса SUB, полностью очищающий накопленные за время экспозиции заряды в секции накопления фотоприемника, никак не влияет на заряды, содержащиеся в секции хранения (области вертикального переноса).

Это свойство дает возможность использования области вертикального переноса ПЗС-матрицы со строчным переносом не только по прямому назначению, как предусмотрено документацией производителя, но и в качестве дополнительной накопительной секции, в которой кадры отдельных изображений могут быть поэлементно просуммированы друг с другом непосредственно перед процедурой их вертикального переноса.

Основные выводы по результатам первой главы

1. Для построения активно-импульсной системы без использования электронно-оптического преобразователя возможно использование функции электронного затвора фотоприемника, но при этом конструкцией такого фотоприемника должна быть предусмотрена возможность суммирования нескольких кадров изображения до их оцифровки.

2. При использовании буферной секции ПЗС-фотоприемника со строчным переносом не только в качестве секции вертикального переноса, но также в качестве дополнительной секции для накапливания зарядов возможно осуществить суммирование нескольких отдельных кадров. Тем самым возможно увеличить общее время экспозиции кадра до необходимой величины. Суммарное время экспозиции при этом может существенно превышать длительность единичного импульса лазерной подсветки.

ГЛАВА 2 РЕАЛИЗАЦИЯ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ВИДЕНИЯ НА ПЗС-МАТРИЦЕ СО СТРОЧНЫМ ПЕРЕНОСОМ

В главе приводится описание способа управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом, позволяющего реализовать на его основе метод наблюдения со стробированием. Описывается алгоритм управления ПЗС-матрицей для реализации активно-импульсного видения и алгоритм управления ПЗС-матрицей при комбинации пассивного режима наблюдения с активно-импульсным. Приводятся критерии выбора ПЗС-фотоприемника на основе предполагаемых характеристик разрабатываемой активно-импульсной системы.

2.1 Управление ПЗС-матрицей со строчным переносом при реализации метода наблюдения со стробированием

Документацией на ПЗС-фотоприемник (независимо от его конкретной модели и производителя) предписывается осуществлять перенос зарядов из секции накопления в область вертикального переноса (буферную секцию) единожды для каждого кадра изображения. Затем, в секции вертикального переноса осуществляется последовательное перемещение зарядов к выходным цепям фотоприемника, а в секции накопления в этот момент осуществляется накопление новых зарядов, несущих информацию о новом изображении. В произвольный момент времени эти заряды могут быть обнулены, чтобы избежать перенасыщения при наблюдении ярких сцен, и в этом случае время экспозиции нового кадра будет составлять время от последнего обнуления зарядов в секции накопления до переноса зарядов в буферную секцию.

Так как обнуление зарядов в секции накопления ПЗС-матрицы при использовании функции электронного затвора не влияет на состояние зарядов, находящихся в ее области вертикального переноса, а перемещение зарядов в эту область добавляет вновь полученные заряды к уже имеющимся, возникла идея осуществить многократное повторение процедуры обнуления и переноса зарядов в буферную секцию без перемещения зарядов внутри области вертикального

переноса (буферной секции). В этом случае требуется управление ПЗС-фотоприемником недокументированным способом.

Суть предлагаемого способа управления ПЗС-фотоприемником заключается в следующем. С лазерным излучателем синхронизируются управляющие ПЗС-матрицей сигналы *Стереть* и *Переместить* (рис. 11). Обозначения сигналов аналогично обозначению на рис. 6–8.

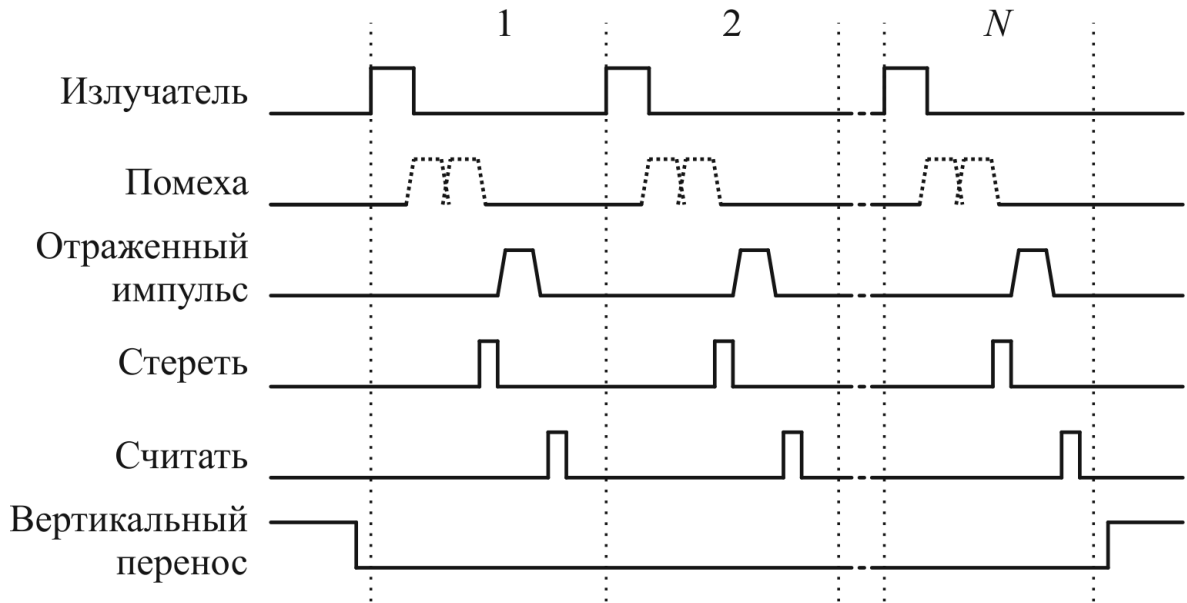


Рисунок 11 – Многократная синхронизация фотоприемника с излучателем.

Пояснения в тексте

Первый сигнал обнуляет заряды в секции накопления фотоприемника, а второй осуществляет перемещение накопленных зарядов из секции накопления в секцию вертикального переноса (буферную секцию). Излучение, отраженное от объектов, находящихся ближе заданного расстояния и представляющих собой помеху, приходит раньше импульса обнуления, а потому в итоговый кадр изображения никакого вклада не вносит.

Аналогично отсекается излучение, отраженное от объектов, находящихся существенно дальше объекта наблюдения, так оно приходит на фотоприемник после импульса перемещения.

Время задержки между срабатыванием лазерного излучателя и сигналом *Стереть* определяется выбранной дальностью наблюдения. Соответственно, в момент времени между сигналами *Стереть* и *Переместить* наблюдается

Отраженный импульс лазерного излучателя, возвращенный от объектов наблюдения. Временной интервал между задними фронтами импульсов обнуления и перемещения определяет глубину просматриваемого пространства и зависит от конкретного фотоприемника.

Затем, вместо того, чтобы начать вертикальный перенос зарядов внутри буферной секции, как того требует документация на фотоприемник, осуществляется наблюдение второго отраженного импульса подсветки и перемещение вновь полученных зарядов из секции накопления в буферную секцию, где они суммируются с уже имеющимися зарядами, полученными при наблюдении первого импульса. Процедура повторяется несколько раз.

При наблюдении всех последующих импульсов лазерного излучателя вновь получаемые заряды в секции накопления фотоприемника добавляются к уже имеющимся зарядам в секции вертикального переноса. Общее количество импульсов лазерного излучателя N может быть произвольным и зависит от конкретных условий наблюдения и выбирается таким, чтобы яркость наблюдаемого объекта была достаточной для того, чтобы оператор мог отличить его от фона.

После завершения процедуры подсветки местности лазерным излучателем осуществляется вертикальный перенос зарядов в буферной секции фотоприемника способом, указанным в документации на него, и их считывание оцифровывающей схемой. По завершении вертикального переноса всего кадра действия повторяются.

На рис. 11 сигнал *Вертикальный перенос* – условный, обозначающий происходит ли вертикальный перенос зарядов в данный момент времени или нет. Сигналы *Стереть* и *Переместить* также являются условными. При управлении реальным ПЗС-фотоприемником обнуление зарядов в секции накопления, перемещение зарядов из секции накопления в секцию переноса и управление вертикальным переносом зарядов осуществляется не отдельными импульсами, а путем подачи определенной последовательности потенциалов на управляющие входы в порядке, определяемом производителем ПЗС-фотоприемника.

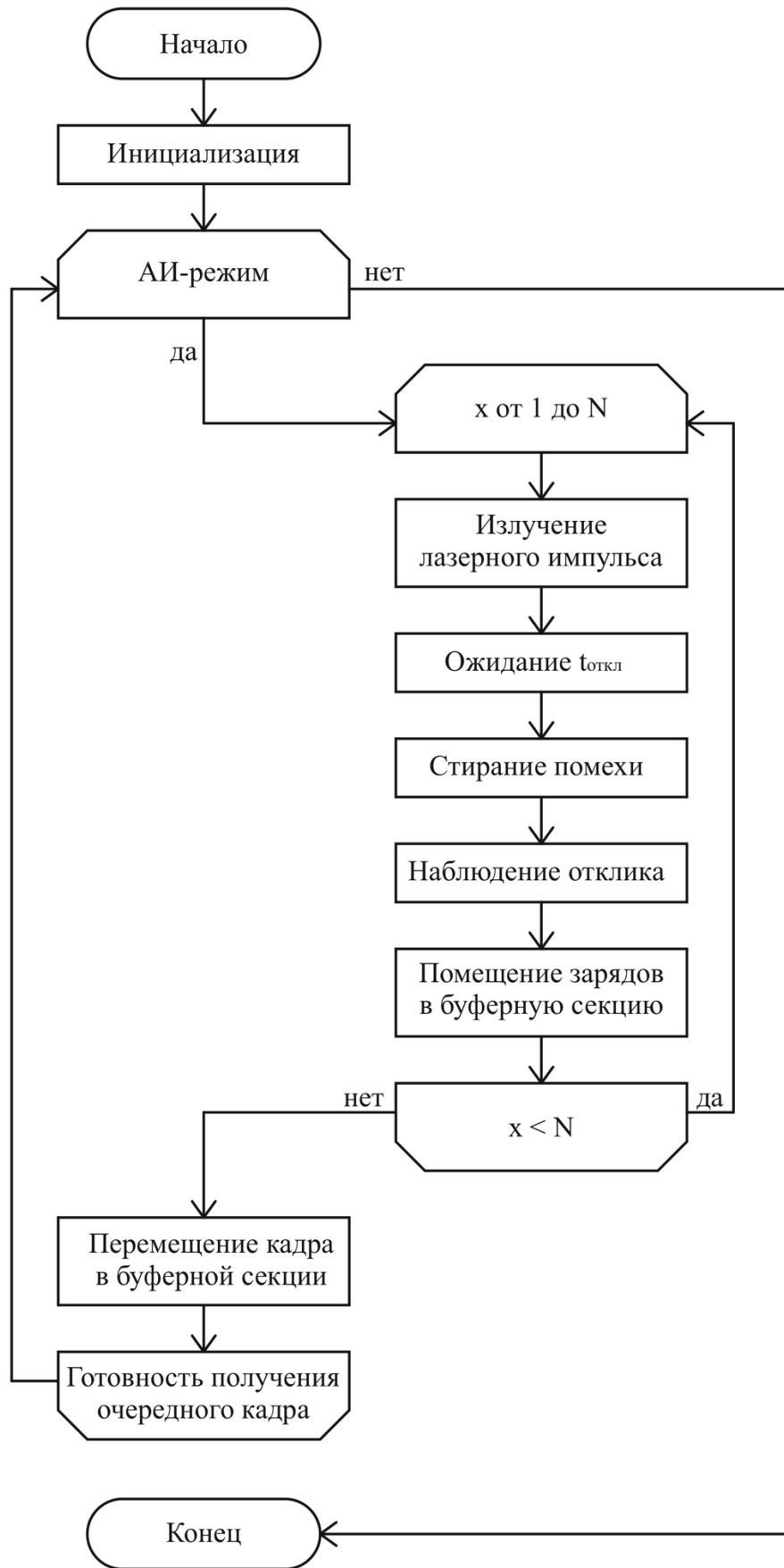


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом в активно-импульсном режиме наблюдения

Графически в виде блок-схемы указанный алгоритм управления ПЗС-фотоприемником представлен на рис. 12. На блок-схеме обозначены:

x – текущий номер импульса лазерного излучателя;

N – общее количество импульсов лазерного излучателя;

$t_{\text{откл}}$ – время ожидания отклика лазерного импульса, т.е. то время, за которое свет успеет дойти до объекта наблюдения, отразиться от него и вернуться обратно.

Управление ПЗС-фотоприемником указанным способом за счет подачи в нужные моменты времени сигналов *Стереть* и *Переместить* позволяет наблюдать свет отраженный только от интересующих наблюдателя объектов и отсеять свет подсветки, отраженный от объектов, находящихся на расстоянии ближе заданного.

За счет того, что буферная секция фотоприемника используется не только для вертикального переноса зарядов, но и для накапливания зарядов при получении одного кадра изображения, становится возможным увеличить время экспозиции кадра до времени, существенно превышающего длительность единичного импульса подсветки.

На указанный способ управления фотоприемником получен патент Российской Федерации на изобретение [80] (Приложение А).

Общая кадровая частота видео изображения при таком способе управления остается в допустимых значениях (25 кадров/сек, 50 кадров/сек и аналогичная), так как основное время в процессе получения кадра изображения внешними по отношению к фотоприемнику устройствами занимает вертикальный перенос зарядов.

Например, при общей длительности кадра 40 мс при кадровой частоте 25 кадров/с, время вертикального переноса $t_{\text{верт}}$ для ПЗС-матрицы ICX168 занимает чуть более 16 мс. Для ПЗС-матрицы ICX445 в режиме центрального окна время вертикального переноса составляет около 30 мс. На наблюдение 50 импульсов лазерного излучателя с частотой повторения 10 кГц затрачивается еще 5 мс ($t_{\text{лаз}}$), а оставшееся время $t_{\text{прост}}$ фотоприемник простаивает в ожидании новых импульсов

(рис. 13). При управлении ПЗС-матрицей «обычным способом», указанное время вертикального переноса затрачивалось бы не один раз на один суммарный кадр, а на каждый отдельный импульс.

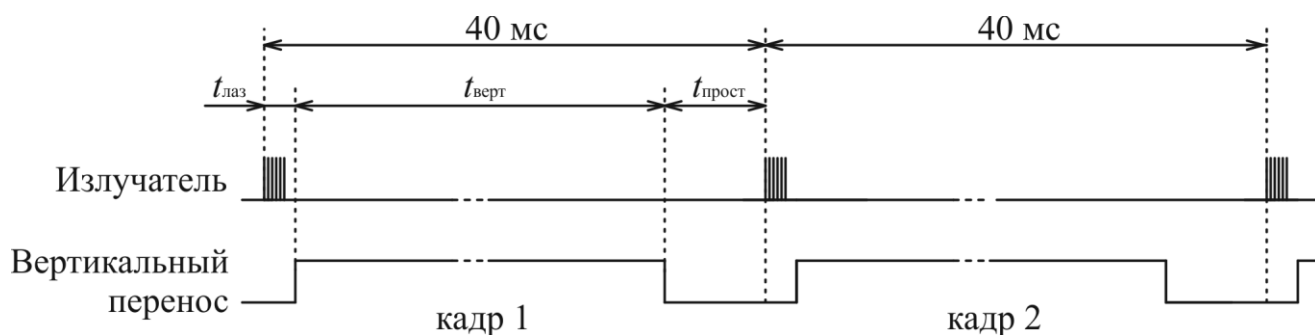


Рисунок 13 – Времена, затрачиваемые на вертикальный перенос и на наблюдение импульсов лазерного излучателя

В качестве примера рассмотрим реализацию метода наблюдения со стробированием на основе уже упомянутой в первой главе диссертации ПЗС-матрицы Sony ICX618 [76].

Так как общий принцип управления всеми ПЗС-фотоприемниками со строчным переносом аналогичен, приведенные в дальнейшем действия с ICX618 могут быть выполнены с любым другим ПЗС-фотоприемником со строчным переносом.

Для простоты восприятия весь процесс получения кадра изображения можно условно разделить на четыре этапа.

Первый этап – это подготовка получения кадра. На этом этапе на управляющие входы $V1...V4$ подаются сигналы такой формы, какая указана в документации [76] на ПЗС-матрицу до подачи положительных потенциалов, обеспечивающих перенос зарядов из секции накопления в буферную секцию.

Второй этап – наблюдение отраженного импульса подсветки. Вместо подачи на входы фотоприемника $V2$ и $V3$ положительных потенциалов считывания, как того требует документация [76], производится подсветка сцены однократным импульсом, а затем, с заданной задержкой, определяемой дальностью наблюдения, на фотоприемник подается сигнал стирания SUB, синхронизованный с импульсным излучателем.

Затем, через некоторое время, наблюдается отклик импульса подсветки, после чего на входы фотоприемника V2 и V3 подаются положительные потенциалы, необходимые для осуществления переноса из секции накопления в буферную секцию зарядов, полученных в результате наблюдений.

Затем, пользуясь тем, что секция накопления изолирована от буферной секции, производится повторная подсветка сцены с последующей последовательной подачей сигнала SUB и положительных потенциалов V2 и V3. По сигналу стирания SUB происходит обнуление секции накопления, но при этом перенесенные ранее в буферную секцию заряды, которые содержат информацию, полученную в момент наблюдения отклика от предыдущего импульса подсветки, остаются нетронутыми.

В момент переноса зарядов, накопленных при наблюдении нового импульса подсветки, в буферную секцию, они складываются с уже имеющимися зарядами, полученными ранее. Подобная процедура повторяется несколько раз [74].

Затем наступает третий этап – завершение переноса зарядов из секции накопления в буферную секцию. На управляющие входы V1...V4 подаются сигналы той формы, которая описана в документации на фотоприемник после подачи положительных потенциалов на V2 и V3.

Четвертый этап – процесс вертикального переноса зарядов. На данном этапе происходит последовательный перенос зарядов в буферной секции из области вертикального переноса в горизонтальный регистр сдвига. Эта процедура не отличается от описанной в документации [76].

На рис. 14 приведены диаграммы управляющих сигналов V1...V4 и SUB, необходимые для реализации описанного способа управления ПЗС-матрицей ICX618, импульс излучателя подсветки и его отклик от наблюдаемых на заданном расстоянии объектов, с которым синхронизован задний фронт сигнала SUB [74].

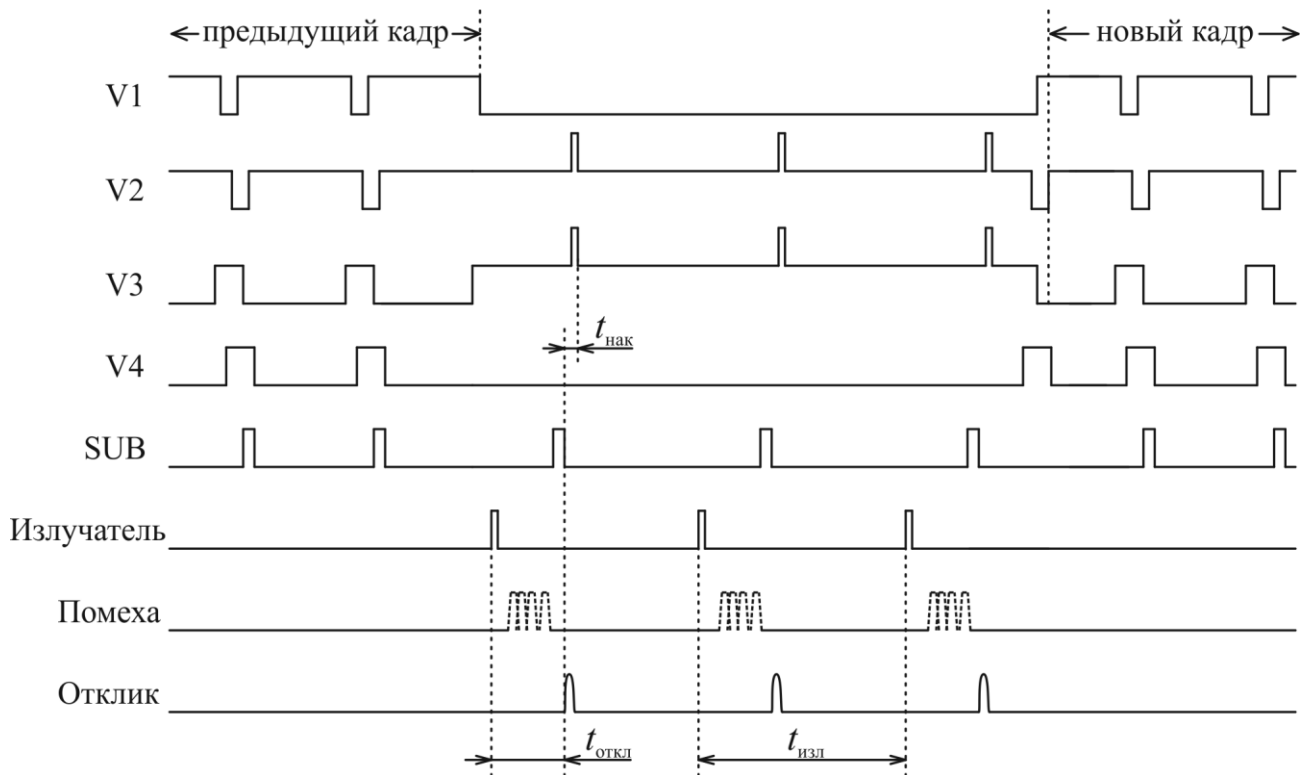


Рисунок 14 – Диаграммы управления ПЗС-фотоприемником ICX618 при реализации метода наблюдения со стробированием

На рис. 14 обозначены:

$t_{\text{изл}}$ – период импульсов подсветки, определяемый техническими характеристиками лазерного излучателя;

$t_{\text{откл}}$ – время отклика, время, необходимое для преодоления светом расстояния от прибора до наблюдаемого объекта и обратно, зависит от дальности наблюдения;

$t_{\text{нак}}$ – время накопления светового потока при наблюдении единичного отклика, определяется длительностью импульса подсветки и минимальным по документации на ПЗС-фотоприемник временем между импульсами считывания V2/V3 и сигналом стирания SUB.

Дополнительно для наглядности на рисунке приведены диаграммы следующих сигналов:

Излучатель – импульс, управляющий лазерным излучателем;

Отклик – условный импульс, показывающий время наблюдения света лазерного излучателя, отраженного от объектов, интересующих наблюдателя.

Помеха – условный сигнал, обозначающий время наблюдения фотоприемником света, отраженного от объектов, которые находятся ближе заданного расстояния, и представляющего собой помеху;

В целях лучшего восприятия диаграммы сигналов на рис. 14 изображены без соблюдения масштаба. В реальной же системе период подсветки и времена между вертикальными переносами строк значительно превышают длительности импульсов переноса и считывания, а длительности импульса подсветки и, соответственно, импульса отклика существенно меньше времени отклика $t_{\text{откл}}$. Кроме того, период повторения импульсов лазерного излучателя $t_{\text{изл}}$ существенно превышает и длительность отдельных импульсов, и время отклика.

В особых случаях, например, когда необходимо обеспечить минимальную глубину наблюдаемого пространства, время $t_{\text{нак}}$ может быть уменьшено до такой степени, что передний фронт сигналов $V2/V3$ начнет совпадать с задним фронтом сигнала SUB. Общее время накопления (экспозиции) для всего кадра составляет

$$t_{\text{экспозиции}} = N \cdot t_{\text{нак}}$$

где N – соответствует числу импульсов подсветки. В примере, представленном на рис. 14, N равно трем.

2.2 Реализация метода наблюдения со стробированием на основе ПЗС-матрицы в условиях низкой освещенности

Описанный разделе 2.1 способ управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом работоспособен в условиях достаточной освещенности (от 100 лк и выше). В условиях низкой освещенности (менее 10 лк) при наблюдении оптического прибора, ведущего встречное наблюдение, по его блику, неизбежно возникнет ситуация, когда количество стробирующих импульсов для получения блика окажется избыточным, но при этом суммарного времени экспозиции для получения изображения фона приемлемого качества окажется недостаточно.

Тогда оператор увидит хорошо заметный блик, но без привязки к конкретному месту на местности [81]. Пример показан на рис. 15.



Рисунок 15 – Изображение бликующих объектов без привязки к фону при наблюдении в условиях низкой освещенности

Для повышения наглядности изображения фона, то есть для увеличения его яркости, общая экспозиция кадра изображения должна быть увеличена. Для увеличения времени экспозиции фона исходные диаграммы управления фотоприемником могут быть изменены путем добавления дополнительного импульса переноса зарядов из секции накопления в буферную секцию с увеличенным временем между обнулением и переносом.

Такое решение позволяет увеличить время экспозиции, но оно оказывается не лишенным недостатка, заключающегося в невозможности увеличения времени экспозиции больше, чем на

$$X \approx 40 \text{ мс} - 0,1 \text{ мс} \cdot (N - 1) - K$$

где:

40 мс – период получения кадров изображения с частотой 25 кадров/сек;

N – число импульсов лазерного излучателя;

0,1 мс – период импульсов (при частоте 10 кГц);

K – время, затрачиваемое на вертикальный перенос зарядов, обычно находящееся в диапазоне от 10 до 30 мс и для ICX618 равное 16,4 мс.

В качестве наглядно поясняющего примера на рис. 16 приведены диаграммы управления ПЗС-матрицей ICX618.

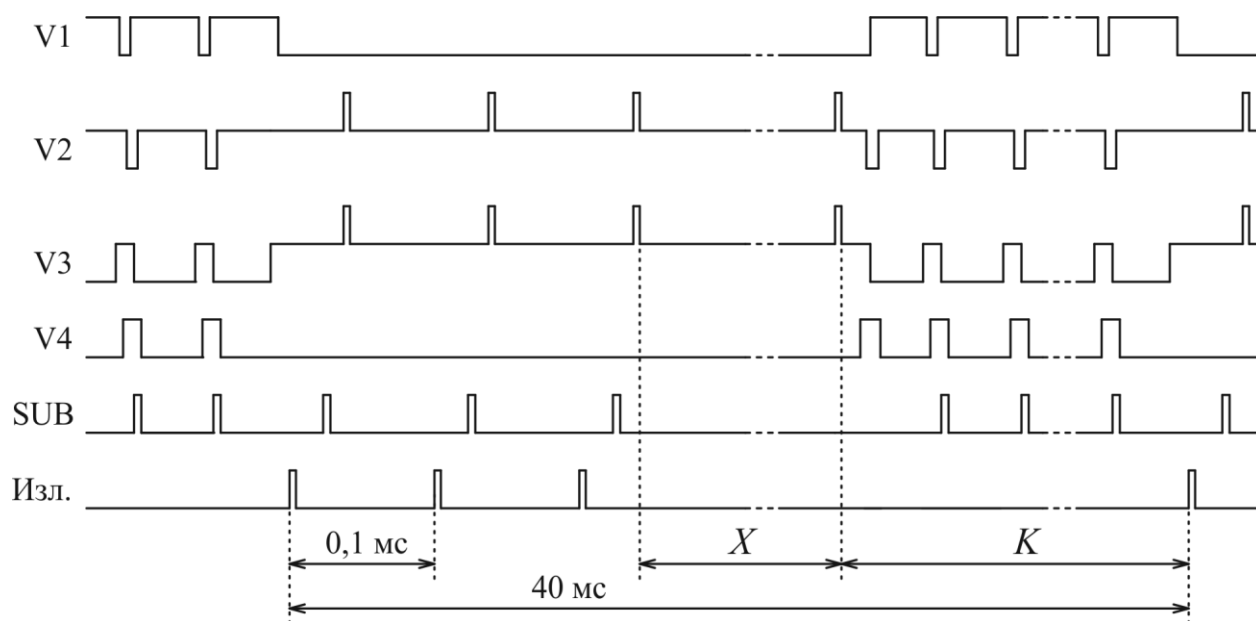


Рисунок 16 – Диаграммы управления ПЗС-фотоприемником ICX618 в режиме стробирования с увеличенным временем экспозиции. Пояснения в тексте

Дальнейшее увеличение времени экспозиции путем увеличения X приводит к падению кадровой частоты из-за того, что суммарное время, затрачиваемое на наблюдение отраженных импульсов, экспозицию фона и вертикальный перенос зарядов начинает превышать 40 мс, максимально допустимые для кадровой частоты 25 кадров/сек.

В частности, недостаточным время экспозиции оказывается при работе с фотоприемниками серии ICX445 [78], для которых время, затрачиваемое на вертикальный перенос, даже при работе в относительно быстром режиме центрального окна высотой 600 пикселей достигает не менее 30 мс.

При наблюдении в пассивном режиме фотоприемник управляется типовым способом, как того требует документация производителя (пример управляющих диаграмм для ПЗС-матрицы Sony ICX618 приведен на рис. 10). В этом случае время экспозиции может быть существенно увеличено без потери кадровой частоты за счет того, что не возникает «простоя» секции накопления фотоприемника – накапливание зарядов происходит в моменты вертикального переноса в буферной секции зарядов, относящихся к предыдущему кадру.

За счет возможности увеличения времени экспозиции изображение фона, полученное в пассивном режиме, обладает бóльшим динамическим диапазоном, чем изображение, полученное в активно-импульсном режиме. Таким образом, при наблюдении в условиях низкой освещенности возникает необходимость объединения отдельно получаемого изображения фона с изображением, наблюдаемым в моменты работы лазерного излучателя.

При реализации активно-импульсного устройства непосредственно на ПЗС-матрице без использования ЭОП объединение может происходить тем же способом, каким осуществляется сложение зарядов в момент работы лазерного излучателя – фактически к изображению фона, полученному в момент вертикального переноса предыдущего кадра, поочередно добавляются вновь получаемые изображения откликов лазерного излучателя [82].

В этом случае при управлении ПЗС-матрицей производятся следующие действия. В начальный момент времени по завершению вертикального переноса зарядов, относящихся к предыдущему кадру, происходит перемещение зарядов, содержащих изображение фона, из секции накопления в буферную секцию. А затем происходит подсветка местности N импульсами лазерного излучателя, способом, описанным в разделе 2.1.

Блок-схема, демонстрирующая в графическом виде алгоритм управления, изображена на рис. 17. Число-буквенные обозначения действий алгоритма на рис. 17 идентичны обозначениям на блок-схеме алгоритма, представленного на рис. 12.

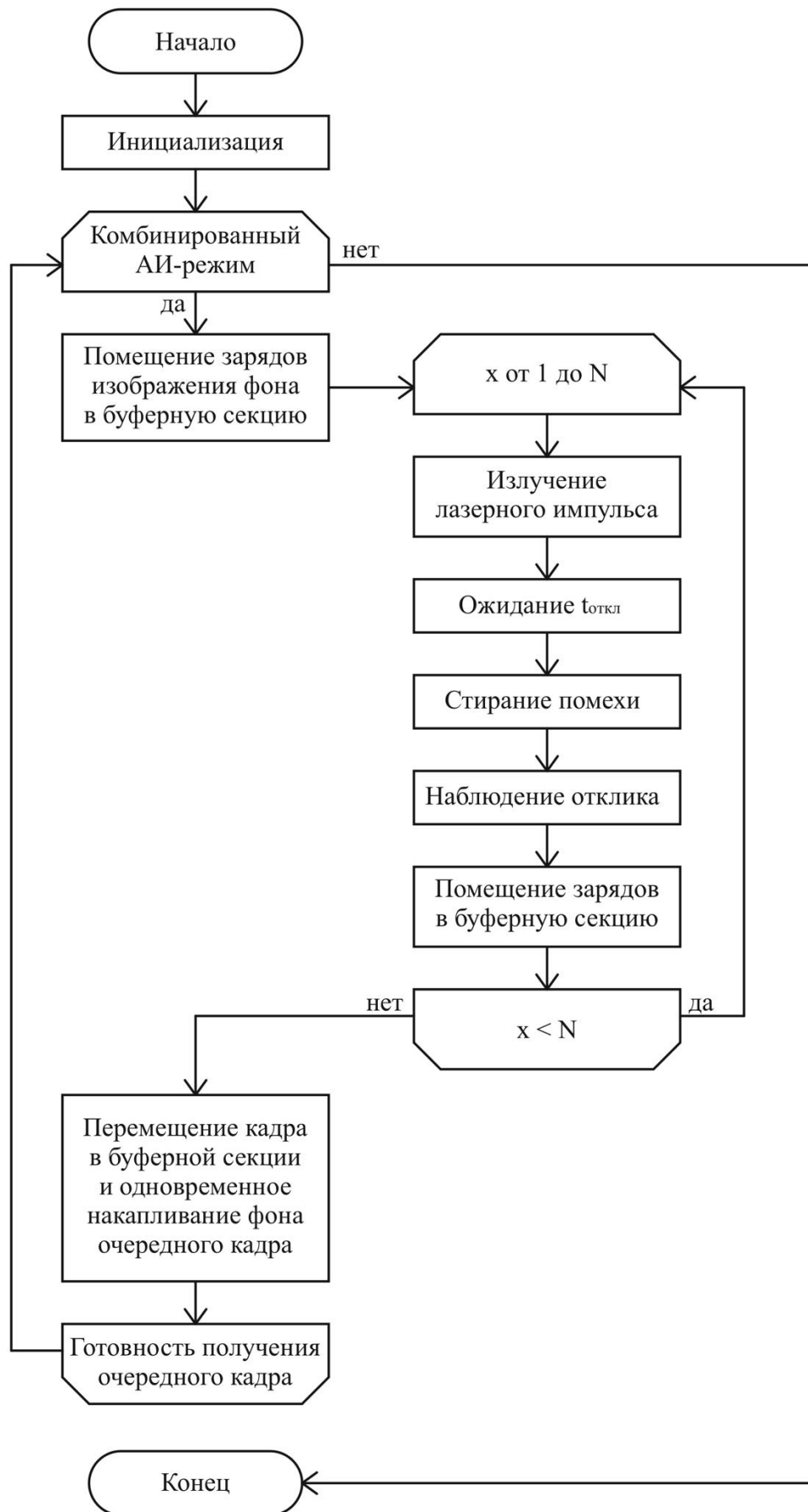


Рисунок 17 – Блок-схема алгоритма управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом в комбинированном режиме

Соответствующая последовательность сигналов управления ПЗС-матрицей в подобном комбинированном режиме работы в общем виде независимо от конструкции конкретного фотоприемника представлена на рис. 18.

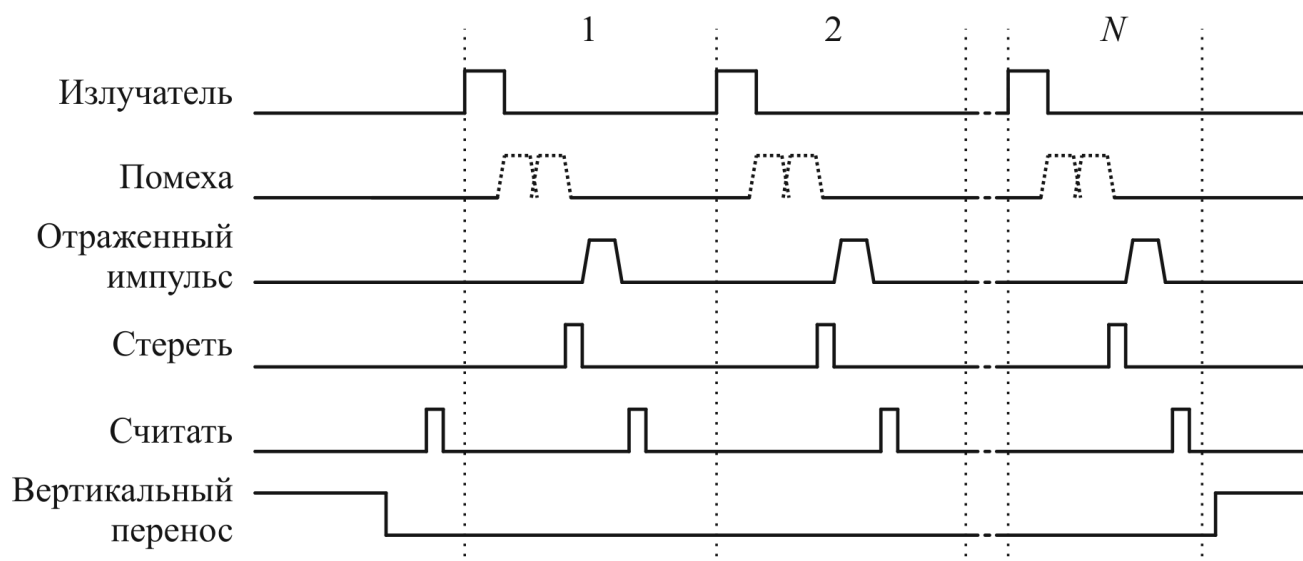


Рисунок 18 – Последовательность сигналов управления ПЗС-фотоприемником при предварительном получении изображения фона

Она аналогична последовательности сигналов, представленной на рис. 11 в разделе 2.1 диссертации, с тем отличием, что в начальный момент времени в нее дополнительно введен импульс считывания, необходимый для получения зарядов, составляющих изображение фона, наблюдаемое в пассивном режиме.

Обозначения сигналов на рис. 18 также соответствуют обозначениям, указанным для рис. 11.

В качестве примера управления конкретным ПЗС-фотоприемником на рис. 19 приведены диаграммы управления для ICX618. Обозначения сигналов аналогичны обозначениям на рис. 14, временной масштаб для наглядности не соблюден.

Время экспозиции фона $t_{\text{эксп}}$ при управлении указанным способом определяется временем между задними фронтами последнего импульса сигнала SUB и импульсов положительного напряжения сигналов V2/V3.

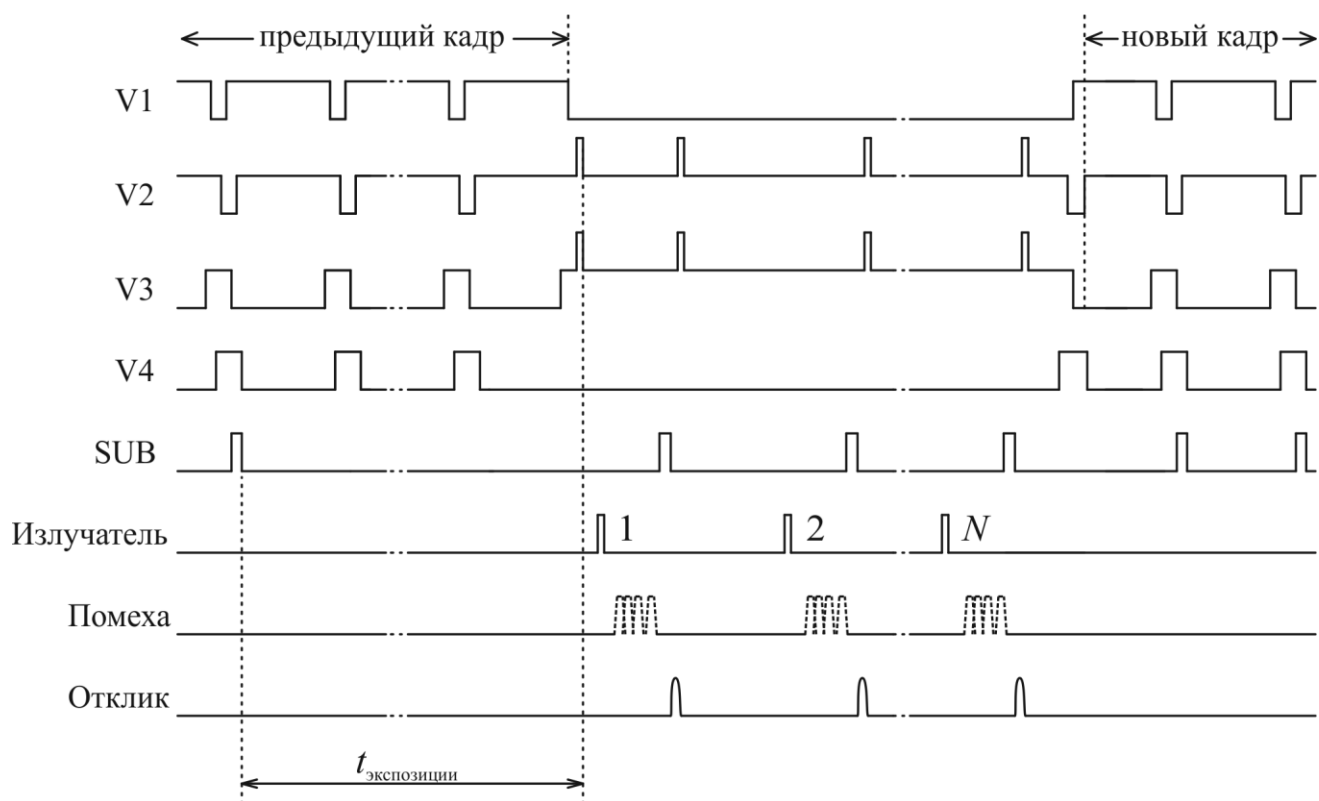


Рисунок 19 – Диаграммы управления ПЗС-фотоприемником ICX618 в комбинированном режиме работы. Пояснения в тексте

Время экспозиции фона $t_{\text{эксп}}$ и общее количество импульсов лазерного излучателя N определяются конкретными условиями наблюдения. Эти величины выбираются эмпирическим путем такими, чтобы и изображение фона, и изображение наблюдаемых отражающих объектов были приемлемого качества с точки зрения оператора.

2.3 Критерии выбора фотоприемника

На этапе разработки цифрового активно-импульсного прибора наблюдения одной из основных задач является выбор ПЗС-матрицы. Критериев выбора при проектировании видеосистем обычно несколько, и решающими из них являются тип фотоприемника, его чувствительность, разрешение и кадровая частота.

Другими немаловажными критериями являются технические характеристики, такие как энергопотребление, рабочий температурный диапазон, эффективное разрешение, форма светочувствительных элементов, их шаг, тип

развертки получаемого изображения (прогрессивная или чересстрочная), цветность изображения, количество каналов вывода и т.д.

Как показано выше, в составе активно-импульсной системы должен быть использован ПЗС-фотоприемник именно со строчным переносом.

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. Для носимого прибора наблюдения частота, существенно превышающая 25 кадров в секунду, является избыточной, так как изменения сцены на такой частоте глаз оператора не воспринимает.

Энергопотребление фотоприемника напрямую связано с частотой получения сигналов изображения, соответственно, выбирать следует фотоприемник с наименьшим энергопотреблением для кадровой частоты 25 кадров в секунду. 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 двойного применения предпочтительнее рабочий температурный диапазон не хуже $-40...+50$ °С, в то время как для приборов гражданского сугубо применения допустимым может быть коммерческий температурный диапазон.

Разрешение фотоприемника должно быть не меньшее, чем разрешение дисплея прибора. Типовым разрешением для современных микромониторов [83, 84], используемых в составе окуляров цифровых приборов наблюдения и очков виртуальной реальности, является 800×600 пикселей, причем пиксели имеют квадратную форму, а значит, чтобы вертикальный и горизонтальный масштаб изображения на дисплее были одинаковыми [85], а изображение не

выглядело искаженным, фотоприемник также должен обладать квадратными пикселями.

По указанной причине в составе носимого активно-импульсного прибора не желательно использование приведенного в качестве примера разделах 1.3 и 2.1 диссертации матричного ПЗС-фотоприемника семейства ICX618, обладающего эффективным разрешением всего 659×495 пикселей. Гораздо предпочтительнее использование ПЗС-матрицы с таким же как у микромонитора разрешением или с несколько бóльшим. В противном случае часть поля зрения дисплея окажется незадействованной.

Микромониторы [83, 84] отображают изображение с прогрессивной разверткой, соответственно, фотоприемник также должен быть с прогрессивной разверткой. В случае применения фотоприемника с чересстрочной разверткой на дисплее будет наблюдаться эффект решетки [86] при попадании в поле зрения движущихся объектов.

При проектировании макетного образца цифрового активно-импульсного прибора наблюдения выбор фотоприемника из многих вариантов [87] был остановлен на ПЗС-матрицах ICX445ALA / ICX445AQA производства Sony [78] и на матрицах семейства ICX692 этого же производителя. Указанные матрицы хорошо зарекомендовали себя при изучении и проведении предварительных исследований способа наблюдения со стробированием на стендах в лабораторных условиях [68, 88].

Основные характеристики ПЗС-матриц ICX445 в черно-белом и цветном исполнении приведены в документации производителя [78, 89]. Ссылка на документацию ICX692 не приводится, т.к. на ее наличие в распоряжении автора, она отсутствует в открытом доступе, а на ее получение требуется сертификат конечного потребителя.

И те, и другие фотоприемники выполнены по технологии EXview HAD [90], и за счет этого обладают высокой чувствительностью.

Внешний вид фотоприемника ICX445 представлен на рис 20.

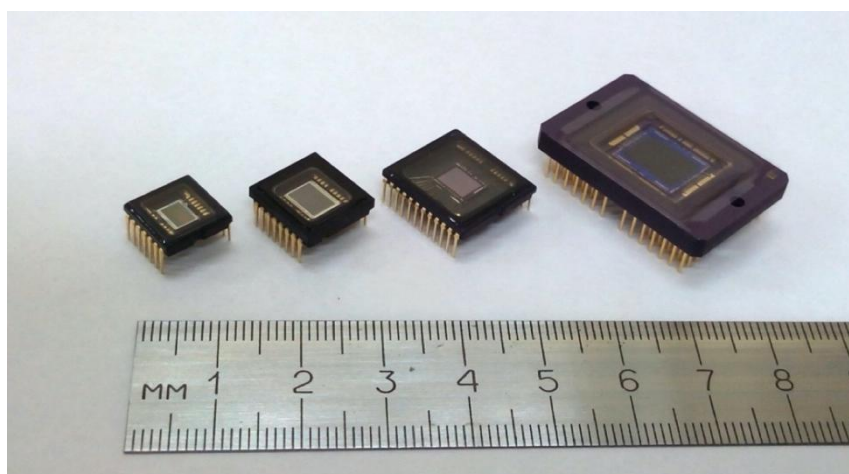


Рисунок 20 – Внешний вид ПЗС-матрицы Sony ICX445 (третья слева)

Эффективное разрешение ПЗС-матрицы ICX445 составляет 1280×960 пикселей, а ПЗС-матрицы ICX692 – 1280×720 . И то, и другое избыточно, так как не может быть реализовано на дисплее разрешением 800×600 . Однако конструкцией обеих ПЗС-матриц предусмотрена возможность работы в режиме «центрального окна», что позволяет получать с них кадры изображений указанного размера.

При работе в режиме центрального окна с числом строк равным 600 максимальная кадровая частота ICX445 составляет примерно 27 кадров/сек (значение определено опытным путем), что незначительно превышает пороговую величину 25 кадров/сек. А ПЗС-матрицы семейства ICX692 способны выдавать кадры изображений со скоростью 30 кадров/сек даже в режиме вывода всех строк полного кадра с максимальным разрешением.

Дополнительным преимуществом использования ПЗС-матрицы в режиме «центрального окна» является возможность юстировки изображения относительно блока лазерных излучателей. Она может выполняться путем горизонтального и вертикального сдвига поля зрения электронным способом по аналогии с выверкой цифрового прицела относительно оружия, на котором этот прицел закреплен [91].

При необходимости, например, в случае использования ПЗС-матрицы, для которой производителем не предусмотрена возможность работы в режиме «центрального окна», размер изображения может быть изменен программно путем выделения необходимого фрагмента из каждого получаемого кадра в момент загрузки получаемых данных в память. Программное изменение размеров изображения осуществляется после его считывания с фотоприемника схемой цифровой обработки, но до преобразований алгоритмами цифровой обработки с целью улучшения и, соответственно, до вывода итогового изображения на дисплей прибора.

Получаемое с ПЗС-матриц ICX445ALA и ICX692ALA изображение монохромное. При необходимости наблюдения цветного изображения могут быть использованы ПЗС-матрицы ICX445AQA или ICX692AQA, являющиеся аналогами ICX445ALA и ICX692ALA, соответственно, дающим цветное изображение. В этом случае потребуется незначительная доработка программной части модуля электроники активно-импульсного прибора, касающаяся преобразования исходного изображения, представленного массивом Байера [92] в полноцветное.

Аппаратная доработка модуля электроники визирного канала не требуется, т.к. и цветные ПЗС-матрицы, и их черно-белые аналоги из этого же семейства имеют одинаковые корпуса, одинаковое расположение выводов и управляются полностью идентично. Аппаратные доработки могут потребоваться только в случае использования лазерного излучателя с длиной волны, не воспринимаемой конкретным фотоприемником из-за наличия в его конструкции ИК-фильтра. Тогда потребуется замена лазерного излучателя.

Основные результаты второй главы

1. При использовании буферной секции ПЗС-матрицы со строчным переносом не только в качестве секции вертикального переноса, но также в качестве дополнительной секции для накапливания зарядов, становится возможным осуществить суммирование нескольких отдельных кадров изображения до их оцифровки. Тем самым, получается увеличить общее время экспозиции кадра до необходимой величины, которая может существенно превышать длительность единичного импульса лазерной подсветки.

2. Предложен способ управления ПЗС-фотоприемником со строчным переносом, заключающийся в подаче на входы управления вертикальным переносом особой комбинации сигналов, отличной от прописанной в документации производителя. Способ позволяет реализовать метод наблюдения со стробированием на указанном фотоприемнике без применения внешних затворов и усилителей яркости. На способ получен патент РФ на изобретение RU 2657292 C1.

3. Для повышения наглядности изображения при наблюдении в условиях пониженной освещенности, когда минимальное время экспозиции фона существенно превышает суммарную длительность импульсов лазерного излучателя, непосредственно перед работой лазерного излучателя дополнительно может быть получено изображение фона, которое в дальнейшем суммируется с изображениями, наблюдаемыми в моменты работы лазерного излучателя. Такой подход позволяет наблюдать блики с привязкой к ориентирам на местности и получить изображение приемлемого с точки зрения оператора качества.

ГЛАВА 3 ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ МАКЕТА АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ

В данной главе рассматриваются вопросы аппаратно-программной реализации макета активно-импульсного прибора наблюдения, использовавшегося при проведении экспериментов в качестве стенда для исследования возможностей фотоприемников. Описывается построение основных узлов цифрового активно-импульсного прибора наблюдения и их взаимодействие между собой. Описывается реализация алгоритмов управления ПЗС-матрицами со строчным переносом.

3.1 Конструктивное исполнение

Первоначально для исследования возможности использования ПЗС- или КМОП-фотоприемников в составе активно-импульсного прибора наблюдения без ЭОП был спроектирован специальный прибор-стенд.

Основная цель исследований на стенде – выяснить, можно ли, и, если можно, то каким способом, управлять фотоприемником, чтобы с его помощью получать изображение синхронно с лазерным излучателем, подсвечивающим сцену, и при этом обеспечить необходимую задержку, равную времени распространения света до объектов наблюдения и обратно [68].

Как показано в разделе 1.2 диссертации и в работе [2], «стандартные» общедоступные КМОП-фотоприемники оказались не пригодны для реализации метода наблюдения со стробированием, поэтому дальнейшие исследования на стенде были сосредоточены на изучении недокументированных особенностей ПЗС-матриц и возможностей их применения.

Схема прибора-стенда показана на рис. 21. Механически устройство состоит из жесткого металлического основания (1) и комплекта закрепленных на нем печатных плат, которые соединены друг с другом кабелями-шлейфами: платы излучателя (3), с установленным на ней лазерным излучателем (2), плат видеобработки (4) и платы фотоприемника (5), с установленным на ней фотоприемником (6). Между основанием и платой фотоприемника располагается

бленда, защищающая фотоприемник от попадания на него постороннего света, которая может рассматриваться как составная часть основания.

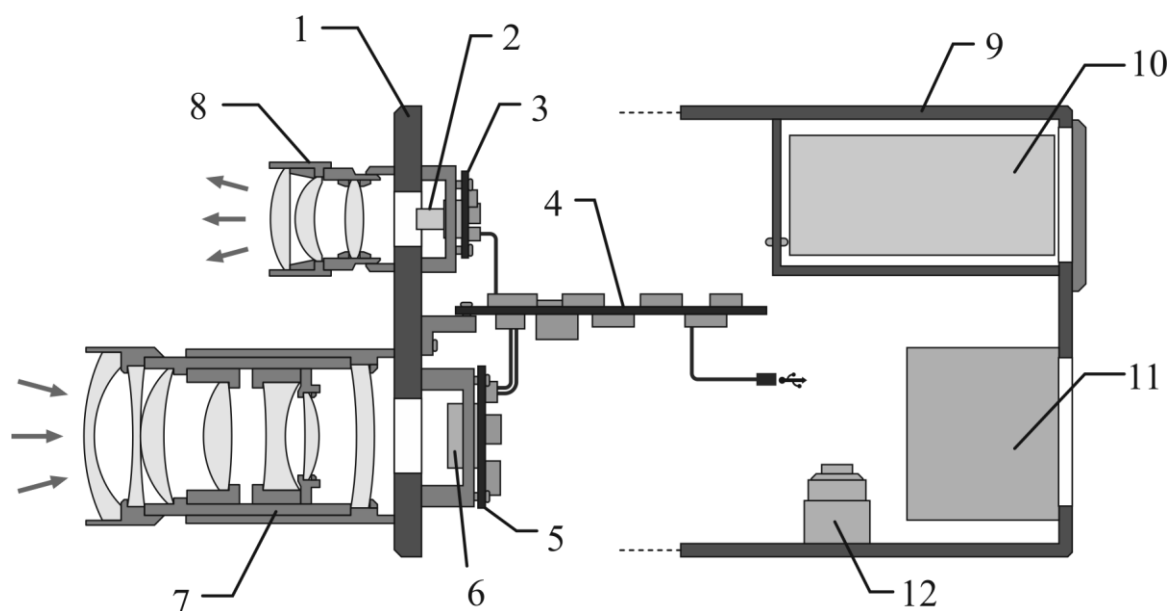


Рисунок 21 – Схема стенда. Обозначения и пояснения в тексте

Также на основании (1) закреплены два объектива (7) и (8), один из которых предназначен для фотоприемника, а другой для лазерного излучателя. Для проведения экспериментов в полигонных условиях также предусмотрен кожух (9) с устанавливаемой в нем аккумуляторной батареей (10), модулем микромонитора (11), герметичными разъемами (12), через которые осуществляется передача изображения на персональный компьютер, и кнопками управления (на рисунке не показаны) [68].

В лабораторных условиях кожух не используется, управление стендом осуществляется при помощи персонального компьютера, а вывод изображения осуществляется только на компьютер, без использования микромонитора. В этих условиях для упрощения конструкции подключение компьютера и источника питания к стенду осуществляется напрямую к платам стенда без использования герметичных разъемов.

На рис. 22 приведены фотографии прибора-стенда без кожуха и с кожухом. В качестве объективов для фотоприемника и излучателя в конструкции макета могут быть использованы любые серийные объективы с резьбовым соединением

C-Mount. В частности, для исследований и проведения экспериментов применялись объективы Computar M5018 с фокусным расстоянием 50 мм при относительном отверстии 1:1,8 и Computar H5Z2518C-MP с переменным фокусным расстоянием от 25 до 135 мм при относительном отверстии 1:1,8, которые были использованы по причине их наличия.



Рисунок 22 – Внешний вид прибора-стенда
(сверху – без защитного кожуха, снизу – в защитном кожухе)

Дополнительно для работы со стендом в условиях сильной освещенности может использоваться узкополосный светофильтр, рассчитанный на длину волны используемого лазерного излучателя, закрепляемый снаружи на объективе.

Основные технические характеристики разработанного прибора-стенда (макета активно-импульсной системы наблюдения) приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики разработанного прибора-стенда

Длина волны излучателя	905 нм
Импульсная мощность излучателя, не менее	200 Вт
Длительность импульса	120 нс
Частота импульсов	10...15 кГц
Соединение объективов	C-Mount
Тип исследуемого фотоприемника	ПЗС
Количество конфигурируемых сигналов	60
Кадровая частота, не менее	25 кадров / сек
Разрешение изображения (зависит от используемого фотоприемника)	до 2000×1000
Соединение с компьютером	HighSpeed USB 2.0
Скорость передачи видеопотока	до 35 Мб/сек
Основное напряжение питания	+5...+12 В
Средняя потребляемая мощность	не более 2,5 Вт
Рабочий температурный диапазон	-40...+50 °С
Габаритные размеры	120×120×60 мм
Масса без аккумулятора	0,9 кг

Объектив излучателя имеет переменное фокусное расстояние от 12 до 25 мм, изменяемое вручную в зависимости от дальности подсветки. При наблюдении на ближних дистанциях (до 200 м) объектив обеспечивает максимально широкое поле подсветки, а при наблюдении на дальние дистанции (до 800 м), поле подсветки, наоборот, устанавливается максимально узким.

Такое перестроение необходимо для концентрации энергии на большие дальности, что связано с ограниченной мощностью используемого лазера, и для обеспечения широкого поля подсветки на расстояниях, когда мощность излучателя является избыточной.

Конструктивно полупроводниковый лазерный излучатель и элементы, обеспечивающие его питание, выполнены на отдельной плате. Это сделано по двум причинам. Первая заключается в том, что расположение на отдельной плате по отношению к фотоприемнику обеспечивает простоту юстировки излучателя по вертикали и горизонтали относительно поля зрения прибора за счет возможности небольших перемещений платы с закрепленным на ней лазерным диодом относительно основания.

Вторая причина заключается в необходимости уменьшения влияния помех высоковольтных источников питания на цепи, оцифровывающие аналоговый сигнал ПЗС-матрицы.

Внешний вид платы с установленным на ней лазерным излучателем представлен на рис. 23.

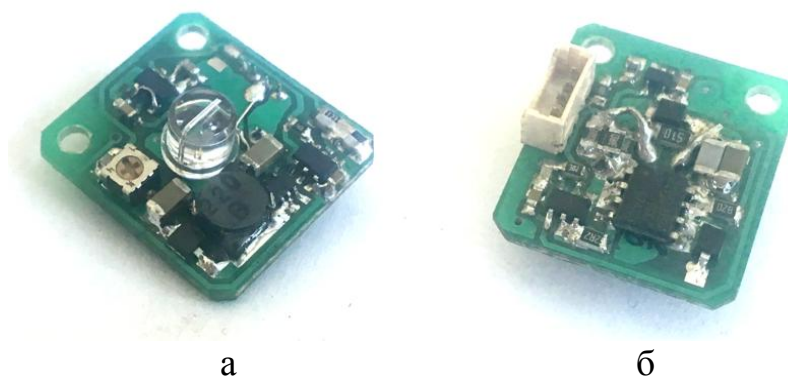


Рисунок 23 – Внешний вид платы лазерного излучателя:

а) со стороны излучателя; б) с обратной стороны

Модуль излучателя подсветки изначально был выполнен на базе импульсного полупроводникового лазерного диода серии QPGAx2S09H производства Perkin Elmer [93], предназначенного для лазерных дальномеров, с выходной импульсной мощностью 200 Вт при длительности импульса 100 нс с частотой повторения импульсов 10 кГц.

При последующей модернизации этот диод был заменен на лазер 905D4S3J08X [94] производства Laser Components. Последний способен обеспечить мощность единичного импульса порядка 260 Вт с частотой повторения до 15 кГц при длительности импульса 120...150 нс. При дальнейшем увеличении частоты или длительности импульса происходила сначала потеря мощности каждого импульса, а затем наступала постепенная деградация лазерного излучателя.

В экспериментах использовался диод с длиной волны излучения 905 нм. Конкретное значение длины волны было выбрано из двух соображений:

- 1) обеспечение максимально возможной безопасности прибора для человеческого глаза;
- 2) обеспечение возможности наблюдения отраженной подсветки самим прибором, что ограничивается спектральной чувствительностью используемого фотоприемника.

На рис. 24 приведено распределение спектра излучения используемого лазерного диода в нормальных условиях, приведенный в документации производителя [93].

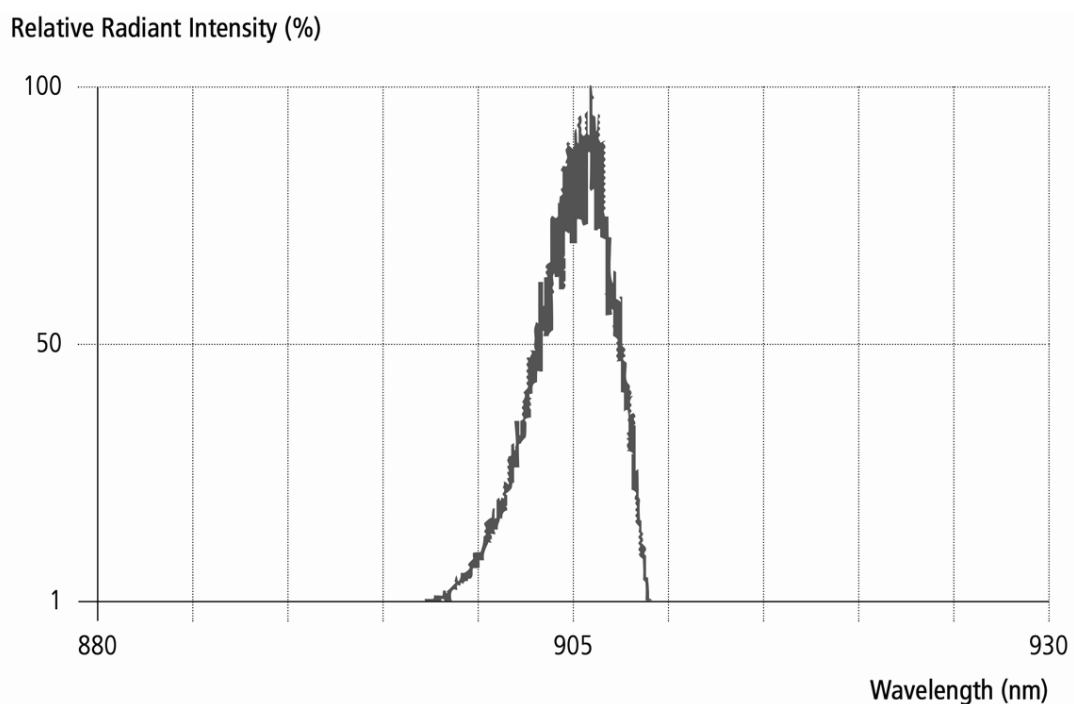


Рисунок 24 – Распределение спектра лазерного излучателя в нормальных условиях [93] (относительная интенсивность в зависимости от длины волны)

Графики спектральной чувствительности ПЗС-матриц ICX445 и ICX692, также взятые из документации производителя, показаны на рис. 25 и рис. 26 (относительная чувствительность или квантовая эффективность в зависимости от длины волны наблюдаемого света).

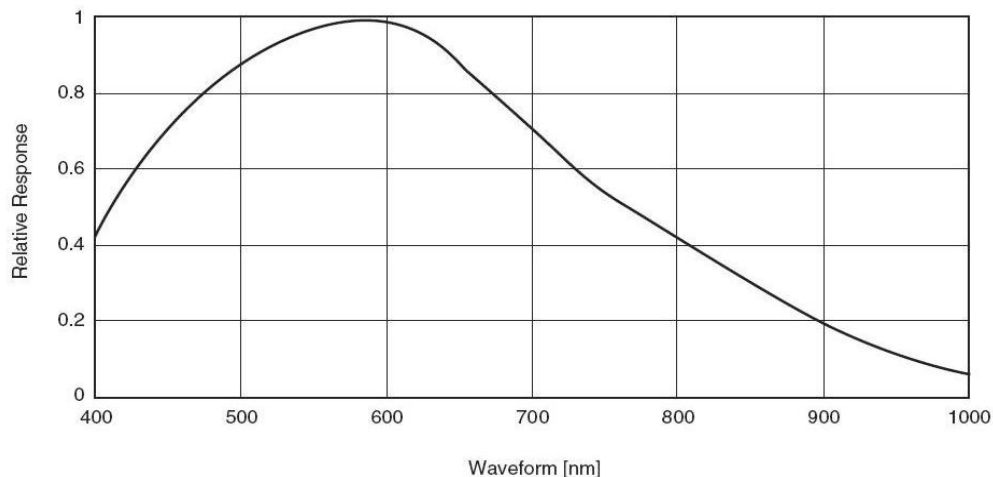


Рисунок 25 – График спектральной чувствительности ICX445ALA [78].

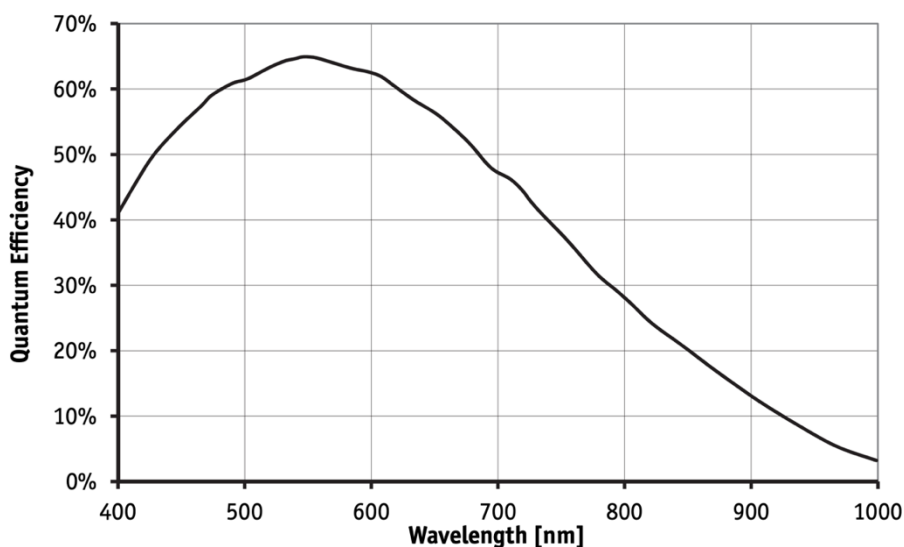


Рисунок 26 – График спектральной чувствительности ICX692ALA

При необходимости может быть использован импульсный лазерный излучатель с другой длиной волны, например, смещенной в сторону ультрафиолетового диапазона [95].

Визирная, или другими словами, приемная часть устройства состоит из платы фотоприемника и плат модуля управления и видеообработки. Внешние виды плат и их подробное описание представлены в разделе 3.2.

Плата фотоприемника – единственная плата всего устройства, которая зависит от модели исследуемой ПЗС-матрицы. Для каждого типа матриц перед проведением исследований проектируется отдельная аппаратно-зависимая плата, так как все ПЗС-фотоприемники имеют разные корпуса, и им необходимо разное количество управляющих сигналов, разные напряжения питания и т.д.

Плата видеообработки и состыкованная с ней коммуникационная плата вместе представляют собой основной элемент активно-импульсного прибора или лабораторного стенда. С их помощью осуществляется управление ПЗС-матрицей и лазерными излучателями, получение с фотоприемника изображения, цифровое преобразование получаемого изображения, формирование служебного кадра и передача итогового изображения на дисплей и (или) внешние устройства, например на ноутбук, а также обеспечивается взаимодействие прибора-стенда с пользователем [95, 97].

3.2 Аппаратно-программная реализация макета прибора

Управление используемым фотоприемником сводится к формированию диаграмм управляющих им сигналов и расчету необходимого времени экспозиции кадра. При работе устройства в активно-импульсном режиме также производится расчет величины задержки срабатывания фотоприемника относительно срабатывания лазерного излучателя и осуществляется запуск лазерного излучателя синхронно с фотоприемником.

Под получением с фотоприемника изображения подразумевается оцифровка выходного сигнала, формирование цифровых отсчетов кадров изображения, формирование управляющих сигналов, необходимых для управления оцифровывающей схемой.

Цифровое преобразование (обработка) изображения осуществляется с целью улучшения его восприятия оператором, за счет формирования определенного художественного образа и выделения на изображении информативных признаков наблюдаемых объектов и фона [98].

Перед выводом на дисплей результат преобразования суммируется со служебным кадром, представляющим собой изображение, реализующее пользовательский интерфейс в виде диалоговых окон и меню, а также демонстрирующим информацию о состоянии прибора и выбранном режиме его работы в виде текста и пиктограмм.

В макете прибора предусмотрена не только цифровая обработка итогового оцифрованного изображения. Так как для реального прибора наблюдения предполагается эксплуатация и в дневное, и в ночное время, т.е. при освещенности менее 0.01 лк ночью и более 10000 лк днем [99], возникает необходимость предусмотреть в устройстве автоматическую нормировку яркости полученного изображения, для его комфортного восприятия наблюдателем за счет аналогового усиления сырого сигнала с ПЗС-матрицы и подбор времени экспозиции кадра в момент наблюдения [100].

Плата видеообработки и коммуникационная плата являются аппаратно независимыми. Все изменения, связанные с количеством и формой управляющих сигналов различными ПЗС-матрицами, на плате реализуются программно. Количество соединительных двунаправленных сигнальных проводников между платой видеообработки и платой фотоприемника предусмотрено с запасом – тридцать штук, что является избыточным для большинства существующих ПЗС-матриц с учетом использования ПЗС-процессора, имеющего один LVDS-канал для вывода изображения.

Управление фотоприемником осуществляется посредством формирования управляющих импульсов программным модулем, реализованным на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС).

Управляющие импульсы подаются на ПЗС-матрицу не напрямую, а через драйверы вертикальной и горизонтальной развертки. Аппаратно они могут быть реализованы либо в виде отдельной микросхемы, либо в используемом ПЗС-процессоре. Помимо них физически в корпусе ПЗС-процессора также располагаются модуль двойной коррелированной выборки (ДКВ), аналого-

цифровой преобразователь (АЦП), усилители, источники прецизионных напряжений и иные необходимые микроэлектронные модули.

Отличительной особенностью прибора-стенда является возможность конфигурации его программной части в реальном времени по желанию оператора и возможность управлять исследуемыми фотоприемниками при помощи сигналов произвольной формы. Форма управляющих импульсов, их количество, взаимная синхронизация и синхронизация с импульсом запуска лазерного излучателя, а также частота повторений и длительности импульсов лазерного излучателя задаются программно. По желанию оператора стенда они могут меняться. Их изменение осуществляется через специально разработанное для этих целей приложение на персональном компьютере, к которому прибор-стенд подключается по шине HighSpeed USB 2.0.

В случае автономной работы прибора-стенда форма импульсов не переконфигурируется, но времена задержек импульсов друг относительно друга и число импульсов лазерного излучателя могут изменяться при помощи кнопок на кожухе прибора.

На рис. 27 представлена архитектура испытательного стенда или макета активно-импульсного прибора наблюдения, отражающая аппаратно-программную реализацию его как электронного устройства.

получения и цифровой обработки изображения, а также программные модули, осуществляющие передачу обработанного изображения на дисплей или на иные внешние устройства.

Помимо ПЛИС на платах прибора-стенда используется сигнальный процессор (СП), работающий с ПЛИС и элементами быстродействующей SDRAM-памяти в единой связке [97]. На сигнальном процессоре фрагментарно реализованы алгоритмы цифровой обработки видеоизображений [102, 103] в той их части, которая легко реализуется на последовательном процессоре, но при этом трудно поддается описанию на языках описания параллельной аппаратуры.

Сигнальный процессор рассчитывает необходимые коэффициенты, участвующие в дальнейшем в алгоритмах параллельной обработки изображений на ПЛИС, обрабатывает и интерпретирует пользовательские команды, получаемые прибором-стендом с персонального компьютера или кнопок управления, осуществляет построение пользовательского интерфейса в виде меню и диалоговых окон на дисплее.

Получаемое с фотоприемника изображение в реальном времени проходит цикл типовых преобразований [102–105], таких, как изменение яркости или контраста, гистограммную обработку, цифровое масштабирование (при необходимости) и некоторых других, а потому оказывается пригодным для наблюдения оператором.

Указанные алгоритмы были частично реализованы самостоятельно в виде программных модулей, частично были заимствованы из открытых источников или из других проектов, в разработке которых автор диссертации принимала участие.

Подробное описание как самих используемых в работе прибора-стенда алгоритмов цифровой обработки видеоизображений, так и их аппаратно-программной реализации выходят за рамки данной диссертационной работы. По этой причине ни применение конкретных алгоритмов обработки изображений в конкретных условиях, ни их анализ, ни обоснование их выбора в тексте не приводятся.

Физически блок электроники прибора-стенда представляет собой три платы (без учета плат лазерного излучателя, дисплея, кнопок, разъемов на корпусе, креплений аккумулятора и т.п.):

- 1) плата фотоприемника;
- 2) плата встраиваемой реконфигурируемой [106, 107] вычислительной системы (ERCS или Embedded Reconfigurable Computing System);
- 3) так называемая коммуникационная плата.

Плата ERCS – универсальная плата, разработанная в Филиале института физики полупроводников им. А.В.Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологическом институте прикладной микроэлектроники» (г. Новосибирск) специально для реализации на ее основе портативных опико-электронных приборов.

На плате располагаются ПЛИС, сигнальный процессор, элементы SDRAM-памяти, USB-контроллер, источники питания для них и элементы постоянной памяти, в которых хранятся программы ПЛИС и сигнального процессора.

Аппаратно плата является неизменной для любого устройства или прибора, в конструкции которого она используется. Изменяется только программное обеспечение для используемых на плате конфигурируемых микросхем, которое пишется под каждый прибор отдельно в соответствии с задачами, решаемыми платой в составе прибора.

Внешний вид платы представлен на фотографиях на рис. 28.

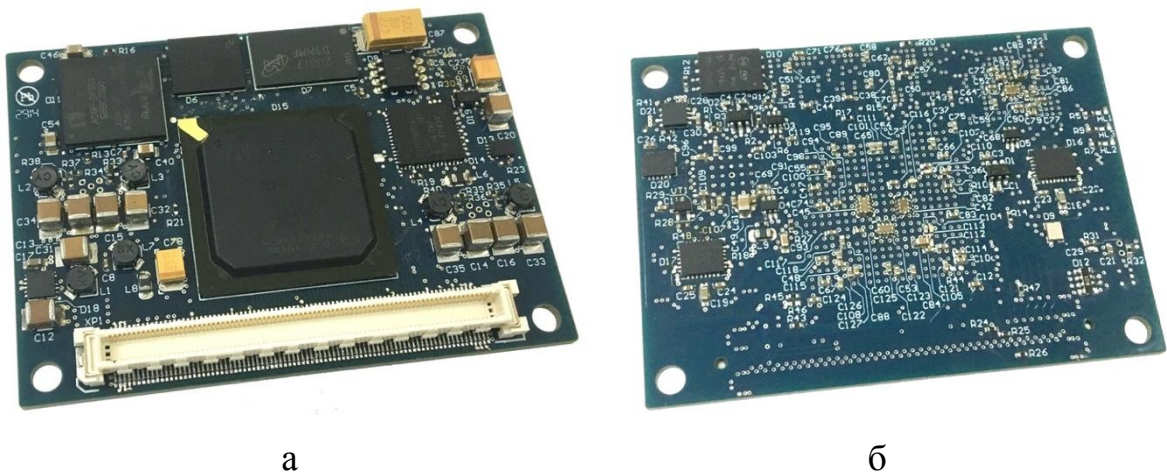


Рисунок 28 – Внешний вид платы ERCS: а) вид сверху; б) вид снизу

Размеры платы составляют 62×45 мм. На плате использованы ПЛИС EP4CE55F23 производства Altera семейства Cyclone IV [108], сигнальный процессор ADSP-BF533 [109] производства Analog Devices, элементы SDRAM-памяти MT48H16M16 и MT48H16M32 производства Micron [110], а также USB-контроллер CY7C68013 производства Cypress [111].

Две другие основные платы прибора-стенда – плата фотоприемника и коммуникационная плата, а именно, их электрические принципиальные схемы и трассировка разрабатывались специально. Также специально разрабатывалось программное обеспечение для платы ERCS – программа для сигнального процессора и программа для ПЛИС.

На плате фотоприемника находятся ПЗС-матрица, ПЗС-процессор и некоторые вспомогательные элементы, необходимые для обеспечения правильной их работы.

В качестве ПЗС-процессора в модуле электроники была применена микросхема серии ADDI9020 (Analog Devices), являющаяся ПЗС-процессором, совмещенным с драйвером сигналов вертикальной и горизонтальной развертки. Кроме того, в экспериментах использовался вариант с расположенными в разных корпусах ПЗС-процессором и драйвером вертикальной развертки.

Во втором случае в качестве драйвера использовалась микросхема VSP1900 [112] производства Texas Instruments, а в качестве ПЗС-процессора – микросхема AD9970 [113] производства Analog Devices.

Помимо них в модуле электроники использован преобразователь ток-напряжение ADA4800 [114] (тоже производства Analog Devices), необходимый для согласования токового выхода фотоприемника с входом ПЗС-процессора. Выбор конкретных микросхем обусловлен обеспечением необходимых технических характеристик и доступностью на российском рынке комплектующих микроэлектроники.

На рис. 29 представлена объемная модель одного из вариантов платы фотоприемника – для ICX445. Платы фотоприемника для других ПЗС-матриц выглядят аналогично и внешне отличаются друг от друга незначительно.

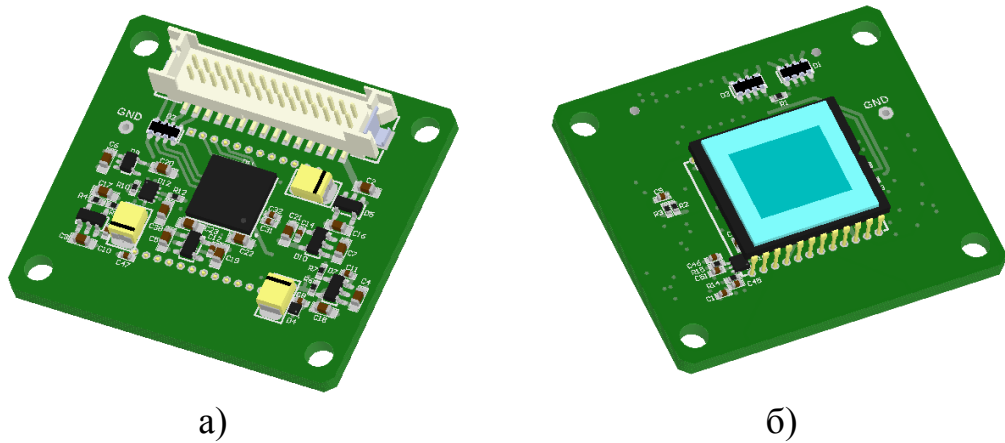


Рисунок 29 – Внешний вид платы фотоприемника (объемная модель):

а) вид со стороны вспомогательных элементов;

б) вид со стороны ПЗС-матрицы

На рис. 30 приведена трассировка платы. Плата шестислойная, что обусловлено необходимостью подведения достаточно большого числа сигнальных дорожек к ПЗС-процессору, выполненному в BGA корпусе и, соответственно, необходимостью трассировки сигналов по внутренним слоям.

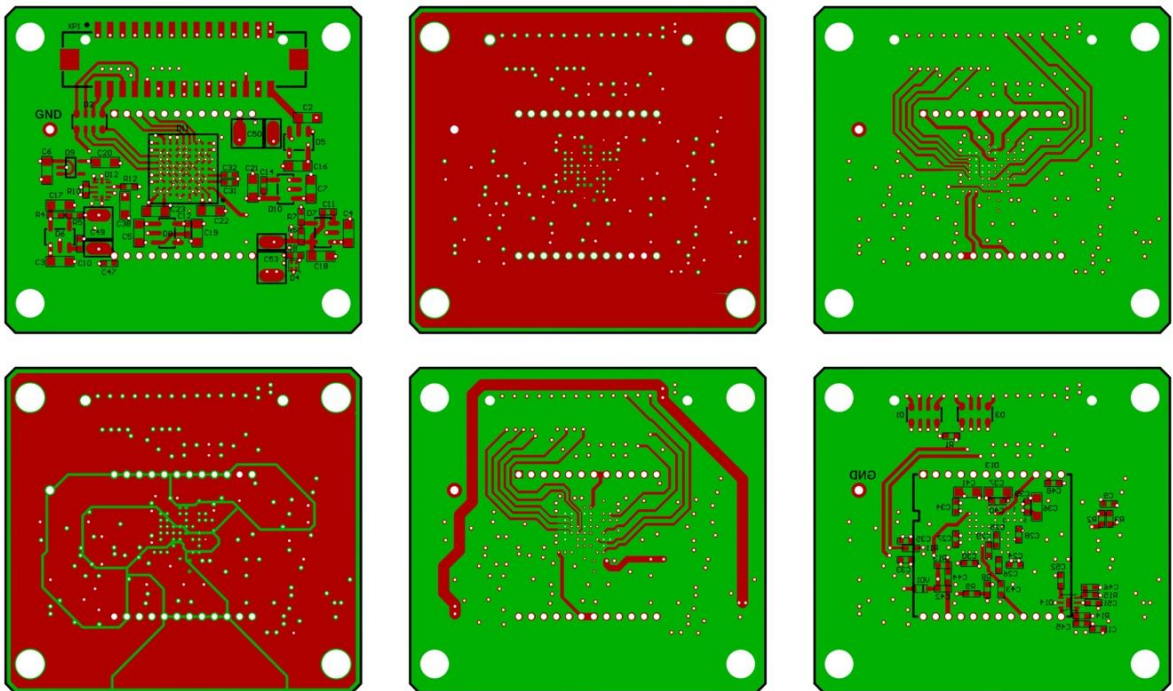


Рисунок 30 – Трассировка платы фотоприемника

Два наружных и два внутренних слоя платы являются сигнальными. Еще два дополнительных внутренних слоя используются в качестве «слоя питания» и «слоя земли», что необходимо для уменьшения паразитной индуктивности в соответствии с рекомендациями, описанными в [115, 116].

Красным цветом на рис. 30 обозначены токопроводящие дорожки, зеленым – отсутствие соединения. Вместе с сигнальными дорожками на наружных слоях черным цветом отображена шелкография, состоящая из контуров располагающихся на плате элементов и их позиционных обозначений на электрической принципиальной схеме. Белым цветом обозначены отверстия, являющиеся либо крепежными, либо частью переходников со слоя на слой.

На последнем изображении текст выглядит отзеркаленным, потому что все слои платы изображены в виде «сверху вниз», в том числе нижний сигнальный слой и располагающийся на обратной стороне платы текст.

Размеры платы составляют 33×36 мм. С точки зрения необходимой площади для размещения всех элементов они являются избыточными, но их величины обусловлены необходимым расположением крепежных отверстий для размещения платы фотоприемника на несущих элементах корпуса прибора наблюдения.

Взаимное расположение элементов на плате подобрано таким образом, чтобы исключить возможность взаимного влияния обратных токов аналоговой и цифровой частей схемы, а также влияния сигналов, управляющих вертикальным и горизонтальным переносом, на цепь аналого-цифровой обработки и тем самым уменьшить искажения и шумы на получаемом изображении.

Коммуникационная плата предназначена для связи платы фотоприемника и дисплея с платой ERCS и фактически является переходником с разъема платы ERCS, на который разведены все сигнальные выводы реконфигурируемой системы, на разъемы платы фотоприемника, дисплея, лазерных излучателей, внешних элементов управления всем прибором (кнопок) и различных датчиков.

Помимо этого, на коммуникационной плате также располагаются комплектующие, не входящие в состав платы фотоприемника или платы ERCS. Среди них:

- элементы цепей питания всего модуля электроники, в том числе понижающие преобразователи напряжения и элементы защиты;
- микроконтроллер, управляющий питанием прибора, обеспечивающий измерение заряда аккумуляторной батареи и обслуживающий органы управления прибором, например кнопки на корпусе, джойстики или энкодеры;
- разъемы и цепи, необходимые для подключения дисплея и управляющих кнопок на корпусе прибора.

Коммуникационная плата выполнена в том же размере, что и ERCS – 62×45 мм, с тем же расположением основных крепежных отверстий и переходного разъема, что сделано для удобства крепления обеих плат в корпусе прибора либо к единому основанию.

Объемная модель платы представлена на рис. 31, а ее трассировка приведена на рис. 32.

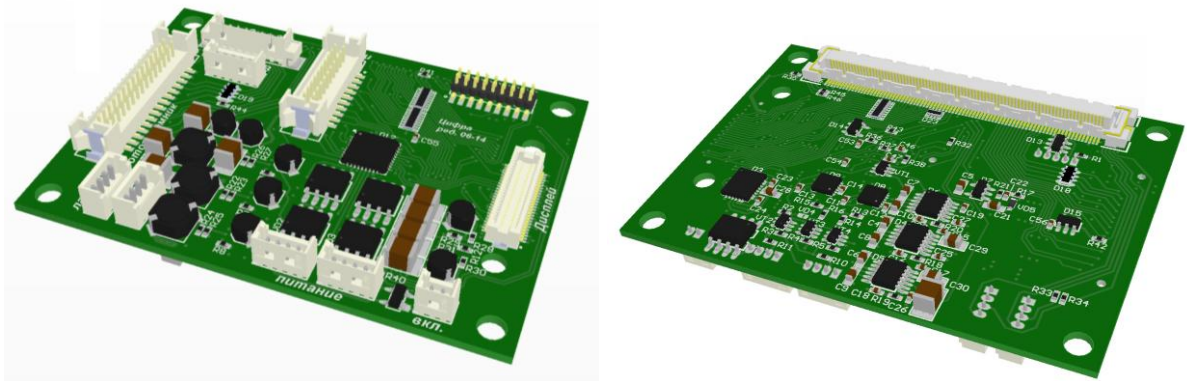


Рисунок 31 – Внешний вид коммуникационной платы с двух сторон
(объемная модель)

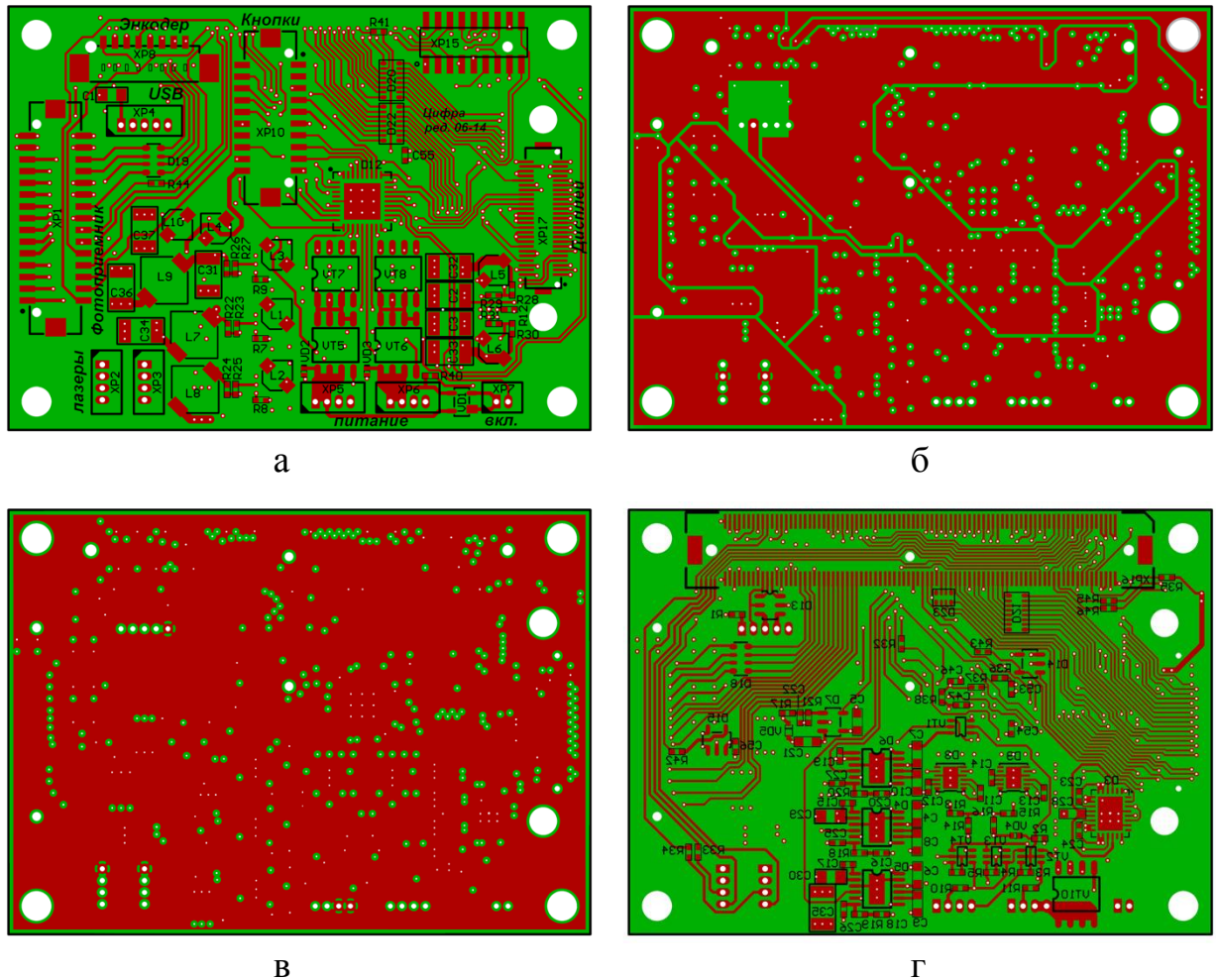


Рисунок 32 – Трассировка коммуникационной платы (пояснения в тексте)

Коммуникационная плата четырехслойная. Как показано на рис. 32, в качестве сигнальных слоев используются верхний (а) и нижний (г) слои платы. Два внутренних слоя выделены под цепи питания (б) и «землю» (в). Цветовое обозначение аналогично обозначению на рис. 30: красным показаны токопроводящие дорожки, зеленым – отсутствующее соединение, черным – шелкография, белым – сквозные отверстия.

Коммуникационная плата соединяется с платой ERCS напрямую через разъемы, а плата фотоприемника соединяется с коммуникационной платой через гибкий кабель, что позволяет разместить в плату фотоприемника в корпусе прибора в другой плоскости.

В частности, плата фотоприемника может располагаться параллельно объективу (вертикально), а остальные платы параллельно основанию корпуса

прибора (горизонтально), то есть перпендикулярно объективу и металлическому основанию, на котором он закреплен.

Фотография соединения вместе всех плат комплекта приведена на рис. 33.

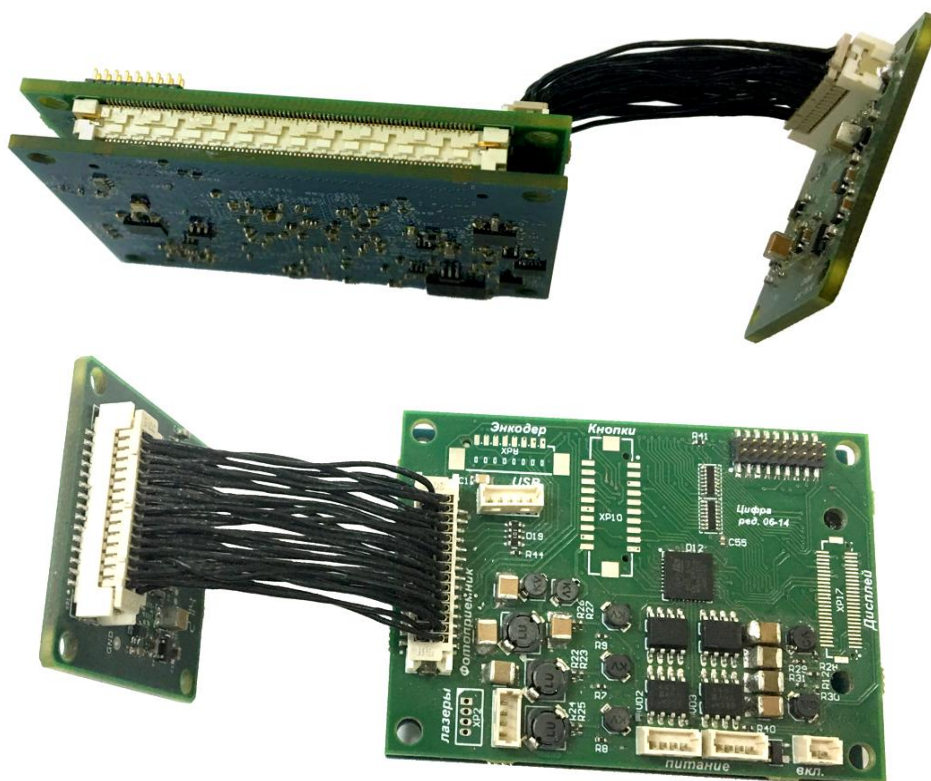


Рисунок 33 – Взаимное соединение коммуникационной платы, платы фотоприемника и платы ERCS (фотография)

В качестве микроконтроллера на коммуникационной плате используется микроконтроллер SMT32 [117] производства ST Microelectronics популярного в настоящее время семейства Cortex M3. Конкретный тип микросхемы STM32F101 был выбран исходя из числа доступных выводов, размеров корпуса и наличия в составе микроконтроллера необходимой периферии.

На микроконтроллер никаких сложных расчетных задач, требующих высокой производительности, не возлагается. Из необходимой периферии он должен иметь АЦП, приемо-передатчики UART, SPI и 10 свободных пинов, подключаемых в качестве ввода-вывода. Поэтому было принято решение использовать самую младшую модель микроконтроллера из серии STM32F10x, так как она для выполнения задач контроля питания и контроля срабатывания управляющих кнопок являлась достаточной.

Из существующих на момент разработки макета активно-импульсного прибора наблюдения и доступных для приобретения микромониторов выбор был остановлен на цветном микродисплее на органических светодиодах SVGA060SC производства Olightek (Китай), внешний вид которого с двух сторон изображен на фотографиях на рис. 34.

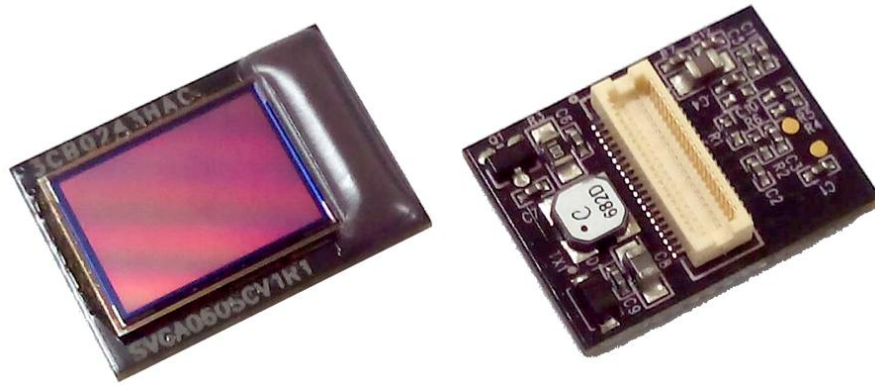


Рисунок 34 – Внешний вид микродисплея SVGA060SC

Его достоинством является возможность получения изображения в цифровом виде, простота настройки и управления, встроенная возможность управления гамма-коррекцией, яркостью и контрастом, а также возможность работы при отрицательных температурах до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Основные характеристики и описание микродисплея приведены в документации производителя [84].

В лабораторных условиях микродисплей не используется, так как изображение проще наблюдать на полноценном мониторе компьютера. В полевых условиях микромонитор располагается внутри корпуса прибора, соединяется с переходной платой при помощи кабеля-шлейфа, а изображение на нем наблюдается через расположенный на корпусе окуляр.

3.3 Аппаратная реализация алгоритмов управления ПЗС-матрицей

Управление фотоприемником сводится к формированию диаграмм сигналов вертикальной и горизонтальной развертки, подаваемых на ПЗС-матрицу через драйвер или преобразователь уровней, а также к формированию диаграмм сигналов, подаваемых на ПЗС-процессор и на лазерный излучатель синхронно сигналам, подаваемым на ПЗС-матрицу.

Так как и режим наблюдения, и некоторые параметры, например, время экспозиции кадра, число импульсов лазерного излучателя, дальность подсветки и т.д. могут меняться по желанию оператора, указанные диаграммы должны частично быть конфигурируемыми. Подача сигналов должна происходить в соответствии с выбранным режимом работы активно-импульсного устройства по заданному алгоритму, например, по приведенному на рис. 12.

Для реализации описанных в главе 2 диссертации алгоритмов управления ПЗС-фотоприемником путем своевременной подачи на входы фотоприемника необходимых сигналов был написан программный модуль, осуществляющий формирование диаграмм необходимых управляющих сигналов. Модуль реализован полностью на ПЛИС и написан на языке описания аппаратуры System Verilog [118–121].

Программный код этого модуля для простоты описания можно разделить на три основные части.

Первая часть отвечает за взаимодействие с устройствами и модулями управления, получает от них команды изменить режим работы, поменять значение параметра, прекратить или возобновить работу.

Вторая часть осуществляет формирование сигналов управления лазерными излучателями и сигналов вертикальной развертки ПЗС-матрицы в соответствии с выбранным в текущий момент времени алгоритмом управления, или другими словами – в соответствии с выбранным режимом работы.

Третья часть кода описывает формирование сигналов горизонтальной развертки и сигналов управления ПЗС-процессором.

В модуле описан автомат состояний, определяющий в какой момент времени какие действия необходимо произвести: считать новый кадр, переместить заряды вертикально на одну строку, осуществить быстрый перенос начала или конца кадра изображения, произвести поэлементный горизонтальный вывод зарядов и т.п.

На рис. 35–38 в различном масштабе представлены примеры наблюдаемых в симуляторе диаграмм сигналов, управляющих вертикальным и горизонтальным

переносом ПЗС-матрицы ICX445ALA. Помимо этих сигналов на симуляторе отображены иные сигналы, являющиеся вспомогательными, а также текущие значения автомата состояний.

На всех четырех рисунках диаграммы соответствуют одному и тому же процессу – управлению перемещением зарядов ПЗС-фотоприемника. Различный масштаб выбран для наглядности, так как в одном масштабе невозможно различить формы нескольких разнотипных сигналов одновременно.

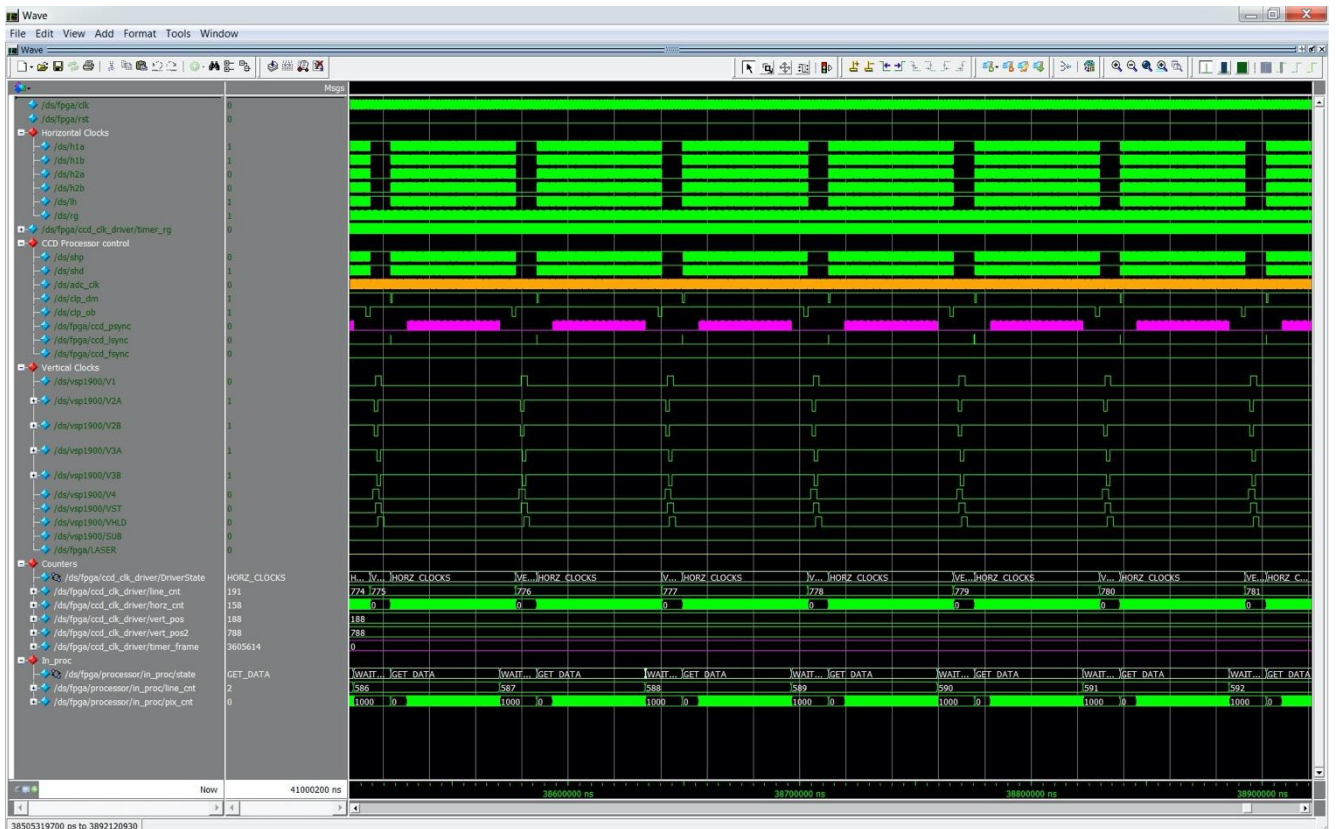


Рисунок 35 – Поочередный вертикальный и горизонтальный переносы

Так, на рис. 35 подобран такой масштаб, при котором формы сигналов управления вертикальным переносом V1...V4 оказываются различимым, а также видно чередование процессов вертикального и горизонтального переноса. При этом, масштаб не позволяет различать очередность фронтов данных сигналов друг относительно друга, а сигналы управления горизонтальным переносом и вовсе «слипаются».

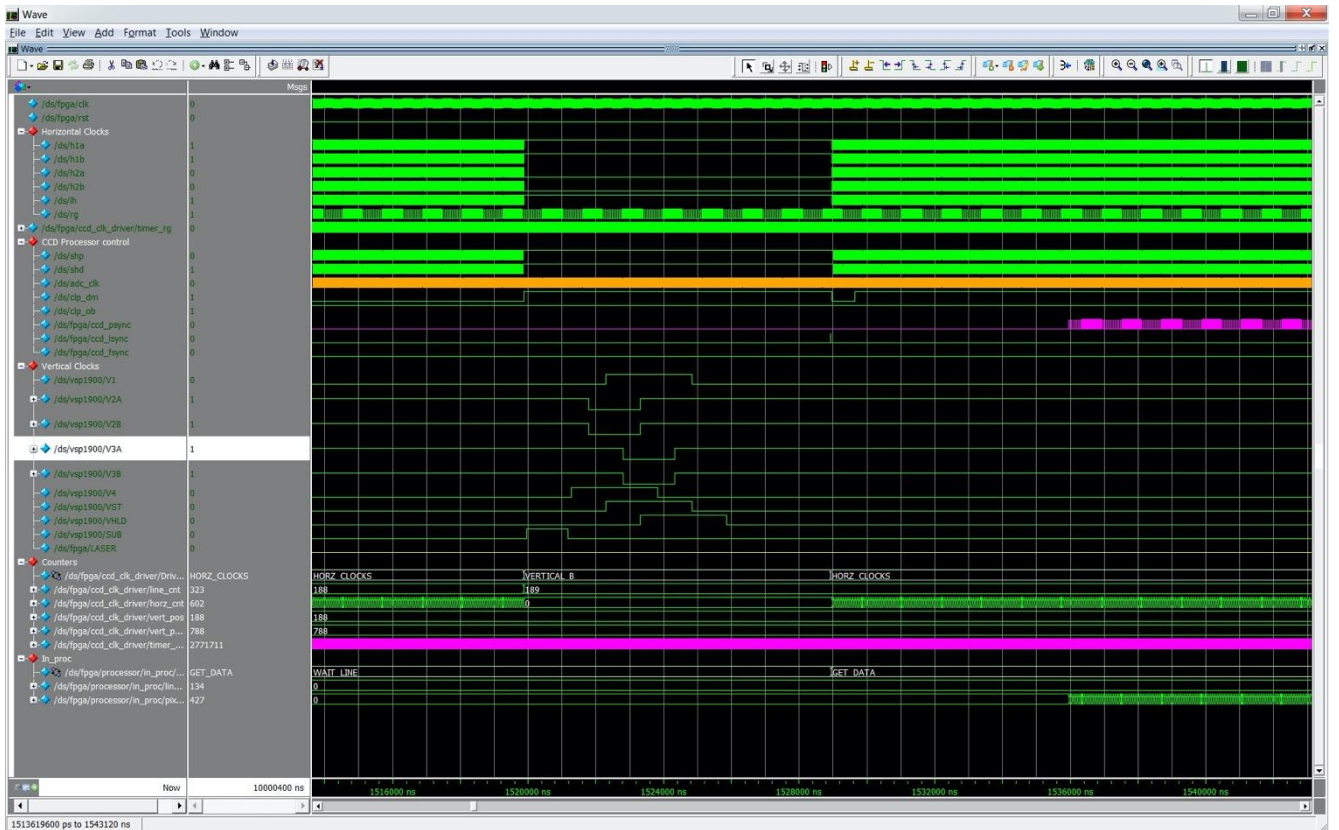


Рисунок 36 – Вертикальный перенос, укрупненный масштаб

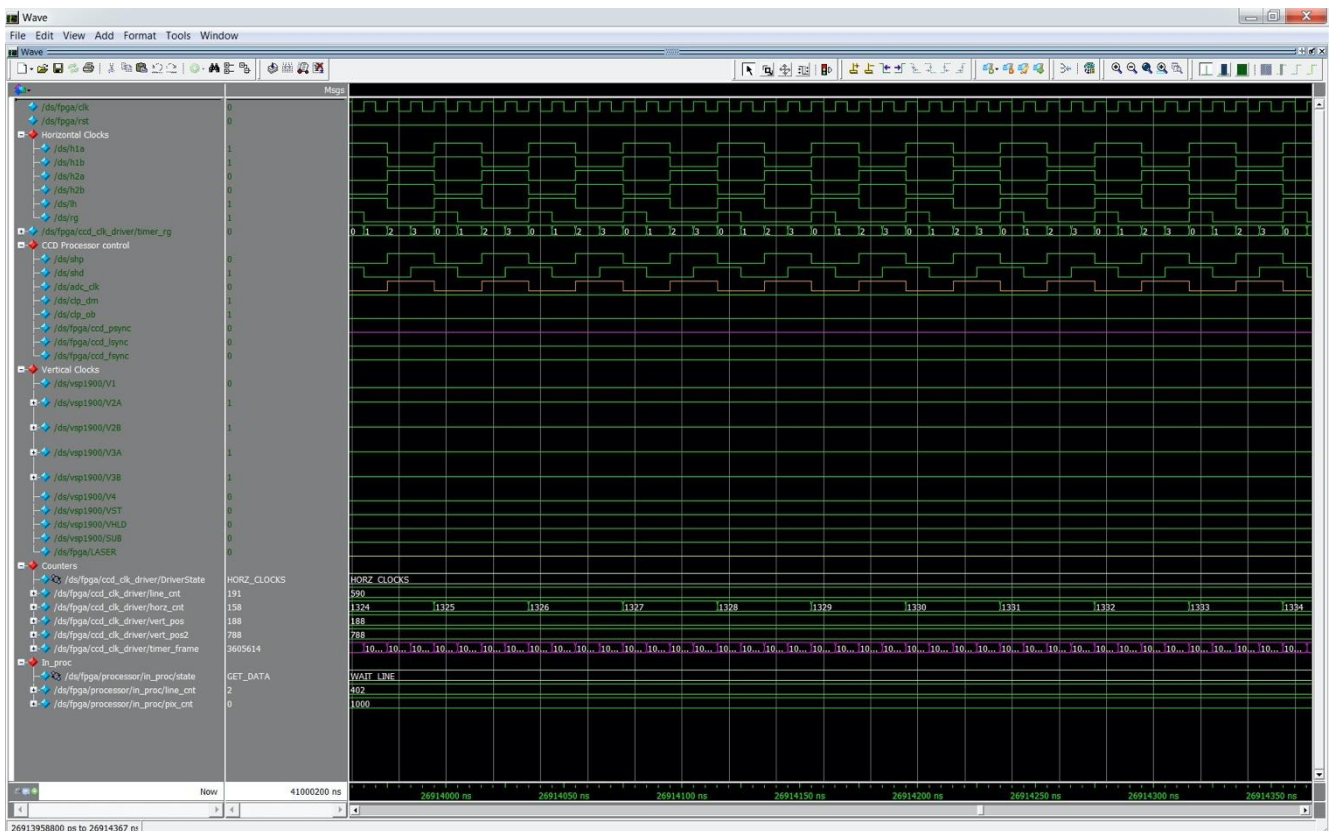


Рисунок 37 – Горизонтальный перенос, укрупненный масштаб

На рис. 36 масштаб подобран таким образом, чтобы очередность фронтов сигналов управления вертикальным переносом бы заметна.

На рис. 37 масштаб позволяет различить формы сигналов управления горизонтальным переносом H1, H2, RG, но при таком масштабе расстояние между двумя соседними фронтами сигналов управления вертикальным переносом оказывается большим, чем ширина поля зрения симулятора.

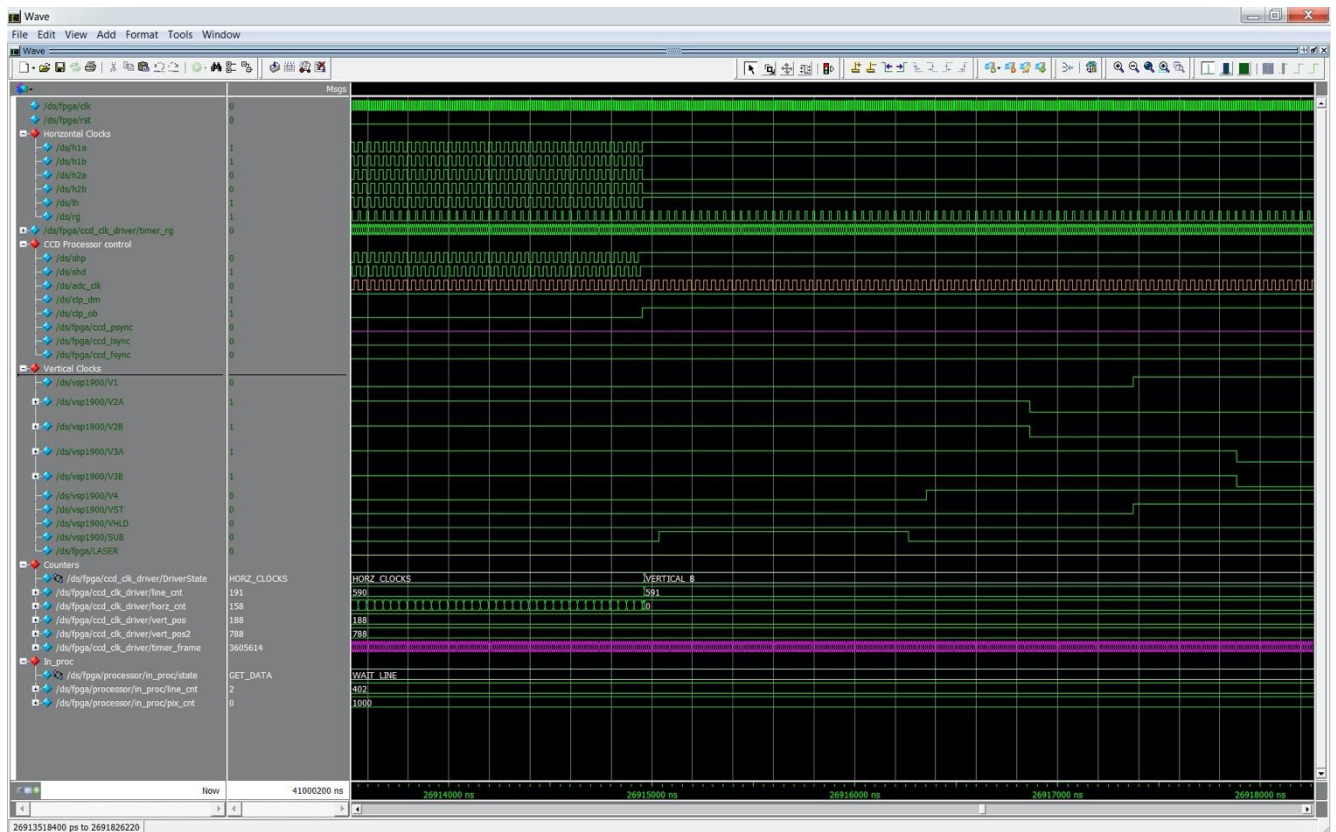


Рисунок 38 – Завершение горизонтального переноса зарядов

На рис. 38 крупно показан временной фрагмент, соответствующих моменту перехода системы из состояния управления процессом горизонтального переноса в состояние управления процессом вертикального переноса зарядов. На диаграммах отчетливо видно прекращение импульсов сигналов H1, H2 (для управления ПЗС-матрицей) и сигналов SHD, SHP (управление ПЗС-процессором), а также возобновление импульсов сигналов управления вертикальным переносом V1...V4. Также видно изменение текущего значения автомата состояния системы.

Аналогично можно представить диаграммы сигналов, необходимых для реализации собственно активно-импульсного видения. Примеры диаграмм

сигналов управления ПЗС-матрицей семейства ICX445 в момент наблюдения лазерных импульсов представлены на рис. 39–41.

Диаграммы сигналов управления иными матрицами выглядят похоже, так как принцип управления большинством ПЗС-фотоприемников со строчным переносом один и тот же, поэтому в целях экономии объема рукописи они не приводятся.

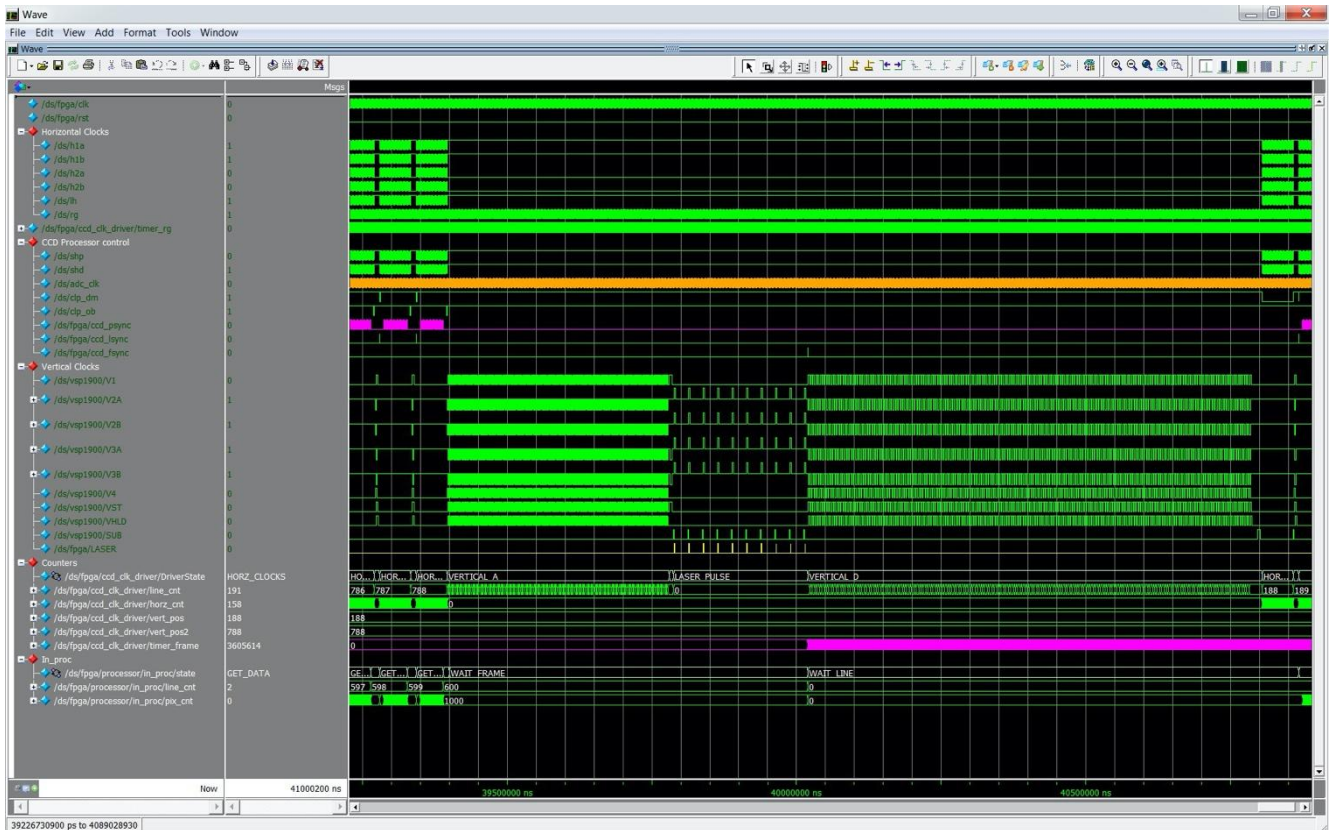


Рисунок 39 – Диаграммы сигналов вертикальной развертки ICX445 при реализации активно-импульсного режима наблюдения

Для наглядности на рис. 39 представлены примеры наблюдения 10 отраженных импульсов лазерного излучателя в промежутке между быстрым вертикальным переносом конца предыдущего кадра и быстрым вертикальным переносом начала очередного кадра при управлении ПЗС-матрицей ICX445 в режиме центрального окна. В реальных условиях работы активно-импульсной системы число импульсов лазерного излучателя может быть как больше 10, так и меньше. Конкретное число приведено для примера.

На рис. 40 показаны диаграммы этих же сигналов в более крупном масштабе. Укрупненный масштаб выбран чтобы были различимы передние и задние фронты управляющих сигналов, то есть для того, чтобы указанные сигналы были более наглядными.

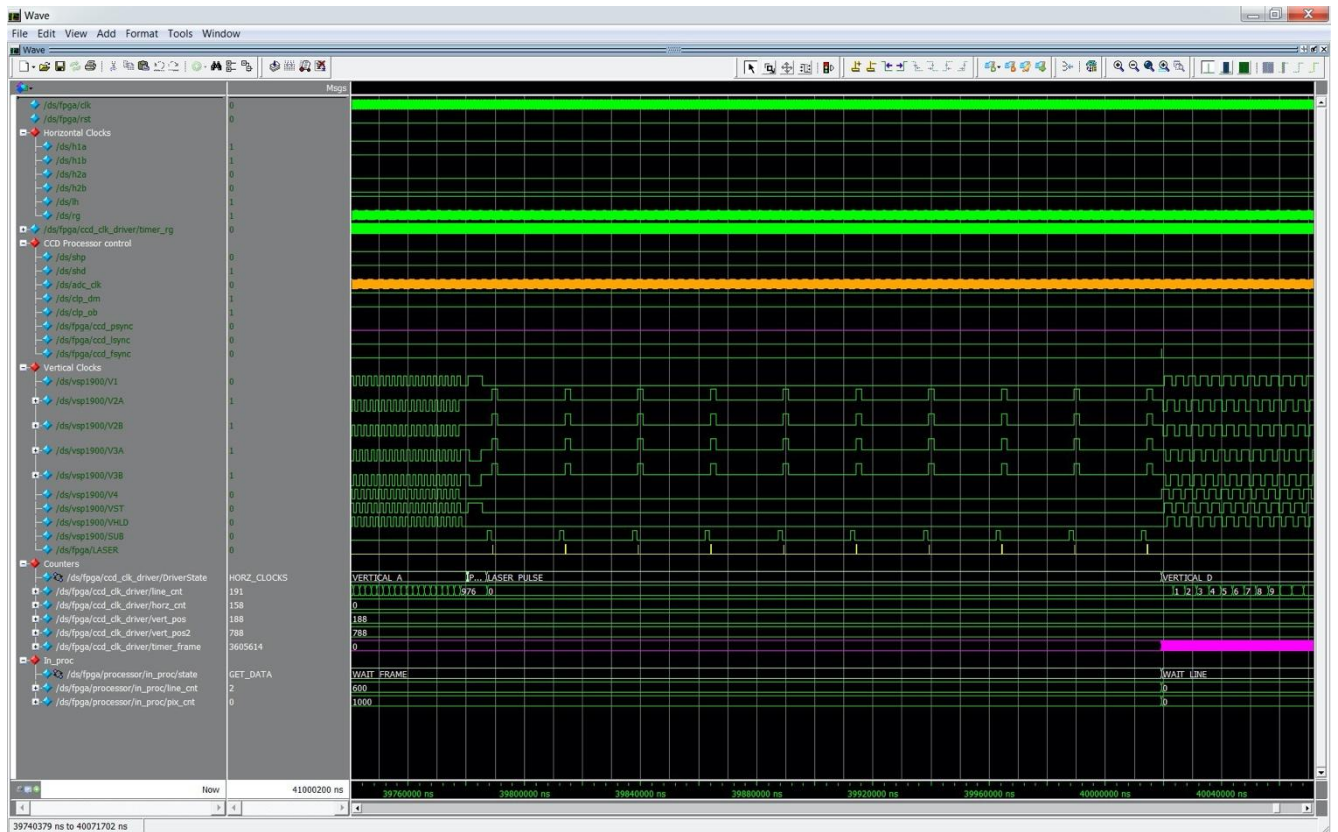


Рисунок 40 – Диаграммы сигналов вертикальной развертки в среднем масштабе

На рис. 41 приведены диаграммы в еще более крупном масштабе, при котором различима очередность поступления фронтов сигналов управления вертикальным переносом.

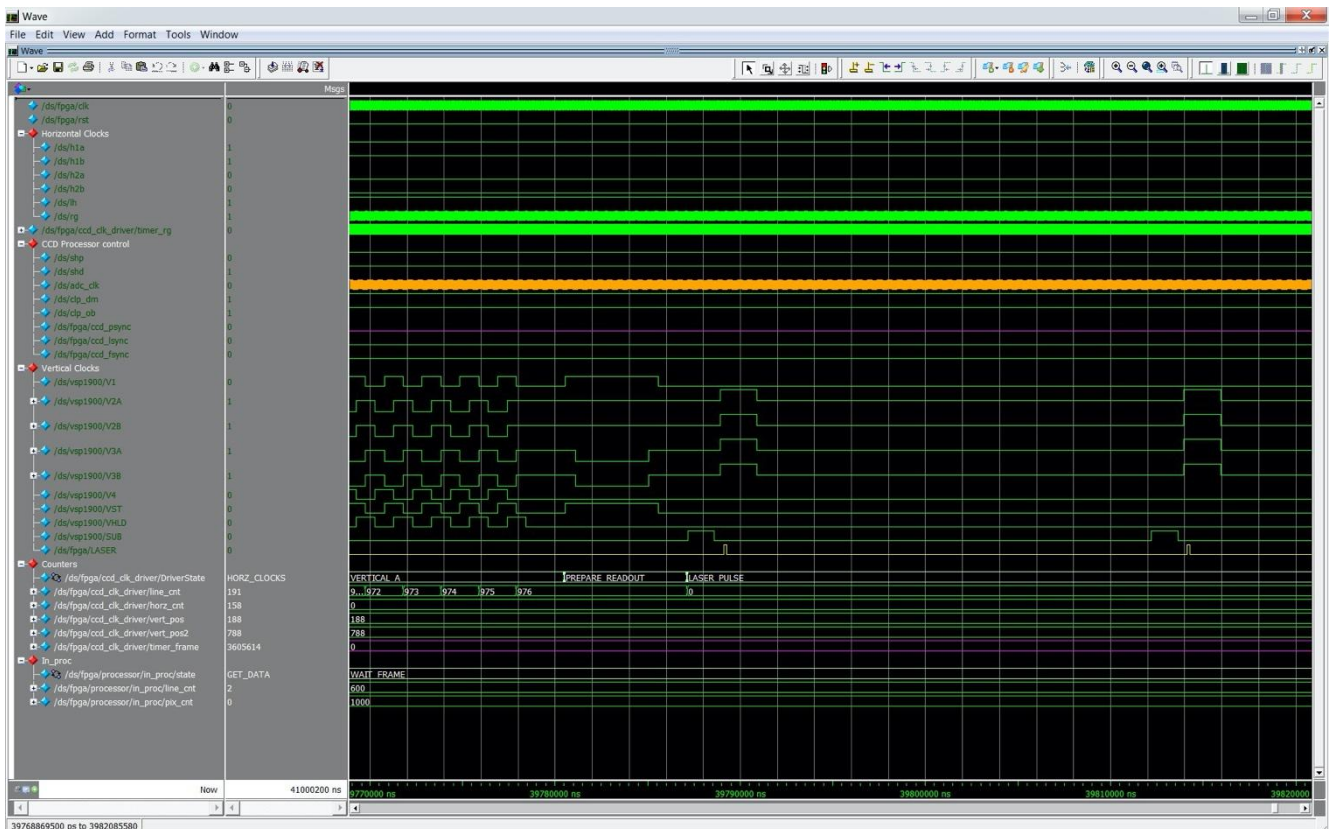


Рисунок 41 – Диаграммы сигналов вертикальной развертки, крупный масштаб

Из рис. 41 видно, что импульс лазерного излучателя срабатывает после сигнала стирания SUB, что может быть истолковано как наблюдение на отрицательную дальность. Вместе с тем, такая процедура необходима при наблюдении на близкие расстояния (порядка 25 метров и менее), т.к. скорость распространения сигнала SUB внутри ПЗС-матрицы существенно превышает скорость передачи запускающего импульса лазерного излучателя.

Фактически, несмотря на то что сигнал SUB был подан раньше сигнала запуска лазера, реально стирание зарядов произойдет чуть позже, чем сработает лазер. Величина задержки или упреждения сигнала стирания относительно сигнала запуска лазерного излучателя определяется экспериментально и вносится в память прибора на этапе его калибровки.

Возможность упреждения сигнала стирания изначально в программном модуле формирования сигналов управления ПЗС-матрицей отсутствовала. Ее необходимость была определена экспериментально, после чего программный код был модернизирован.

На рис. 42 приведены аналогичные диаграммы, но при наблюдении на большие расстояния. В данном случае время между излучением импульса подсветки и возвращением отраженного света существенно превышает время распространения сигнала SUB по внутренним цепям ПЗС-матрицы, поэтому SUB подается на фотоприемник позже срабатывания лазерного излучателя.

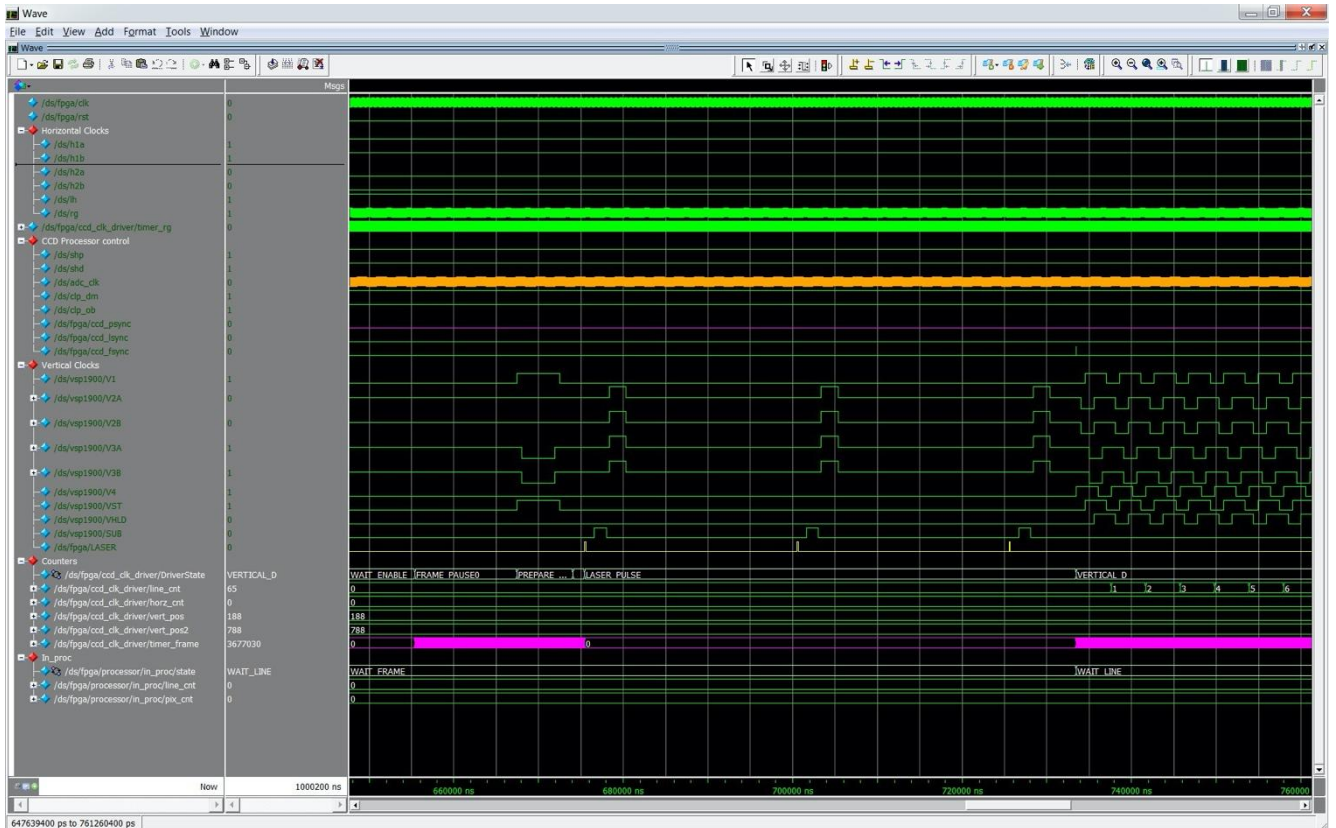


Рисунок 42 – Диаграммы сигналов вертикальной развертки ICX445 в активно-импульсном режиме работы при наблюдении на дальние расстояния

Такие диаграммы сигналов управления ПЗС-матрицей выглядят более наглядными, так как они больше похожи на условные диаграммы, приведенные во второй главе диссертации.

На скриншоте симулятора на рис. 42 отображены только три импульса управления лазером. Малое количество импульсов позволило отобразить на диаграммах одновременно три временных участка – подготовку к наблюдению отраженного света, последовательное излучение и наблюдение трех отраженных импульсов, а также начало вертикального перемещения зарядов в области вертикального переноса (буферной области) ПЗС-матрицы.

Отладка программного модуля формирования диаграмм управляющих сигналов производилась сначала на симуляторе – по мере написания отдельных фрагментов кода. И только затем, уже после выявления имевшихся ошибок и их исправления, отладка производилась непосредственно «в железе».

Такой подход позволил, во-первых, ускорить разработку и отладку программного обеспечения, так как на симуляторе выявить неадекватное поведение отдельных программных модулей проще. Во-вторых, такой подход позволил уменьшить вероятность вывода из строя ПЗС-фотоприемника на этапе отладки программных модулей.

Аналогичные диаграммы сигналов, приведенные на скриншотах симулятора, могут наблюдаться непосредственно на входах ПЗС-матрицы при помощи осциллографа. Пример наблюдаемых на экране осциллографа форм сигналов показан на рис. 43.

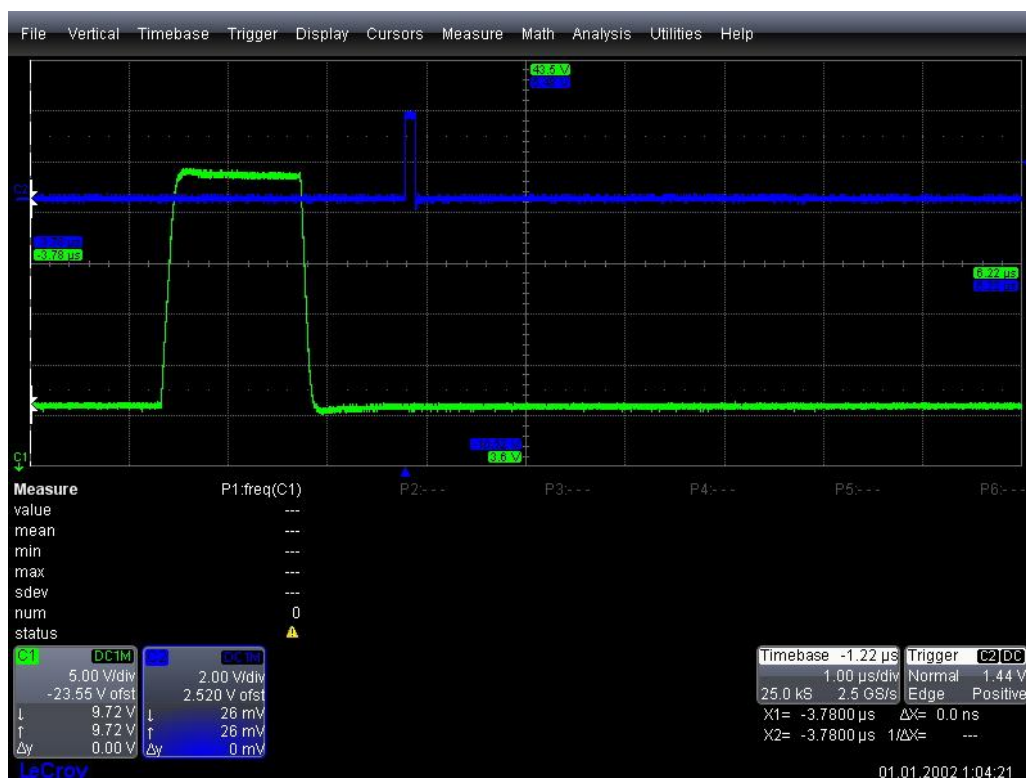


Рисунок 43 – Пример осциллограмм сигналов импульса SUB и импульса управления лазерным излучателем. Для наглядности SUB подается на вход ПЗС-матрицы со значительным упреждением

При этом от диаграмм, наблюдаемых при помощи симулятора реальные формы сигналов отличаются тем, что осциллограф не позволяет выводить на свой экран одновременно все управляющие сигналы. Причина заключается в ограниченности числа имеющихся в распоряжении пользователя измерительных каналов (обычно 1, 2 или 4). Из-за этого невозможно одновременно пронаблюдать синхронность фронтов большого количества управляющих сигналов, а демонстрируемые на экране осциллографа формы сигналов оказываются менее информативными и менее пригодными для демонстрации, хотя и позволяют показать действительную форму конкретного сигнала, а не его предполагаемую форму и амплитуду.

Само собой, при необходимости синхронность срабатывания можно определить поочередными наблюдениями проверяемых сигналов относительно общего, выбранного в качестве эталонного. Это неотъемлемая часть процедуры отладки, но она не наглядна, поэтому соответствующие изображения в данном разделе не приводятся.

На этапе отладки программного модуля ПЛИС производились наблюдения формы управляющих сигналов осциллографом непосредственно на входах ПЗС-матрицы, а также на входах ПЗС-процессора, на входах промежуточных микросхем-драйверов, на выходе преобразователя ток-напряжение, согласующего токовый выход ПЗС-фотоприемника со входом ПЗС-процессора и на разъеме соединительного кабеля со стороны управляющей платы.

Цель указанных наблюдений заключалась в том, чтобы определить не только правильность заданной формы конкретного сигнала или выявить ее возможную ошибочность, но и измерить истинные величины напряжений необходимых сигналов, чтобы убедиться в том, что эти величины соответствуют значениям, предъявляемым производителем конкретной ПЗС-матрицы в документации на нее.

В дальнейшем отладка и настройка программного модуля производилась посредством наблюдения и визуального анализа получаемого ПЗС-матрицей

изображения, которое выводилось на экран персонального компьютера через специально разработанное для этих целей приложение.

Например, в целях повышения скорости работы модуля уменьшались длительности сигналов управления вертикальным переносом зарядов ниже среднего значения, рекомендованного производителем в документации. При достижении некоего порогового значения на наблюдаемом изображении начинали появляться дефекты, легко обнаруживаемые человеческим глазом. При появлении дефектов длительности сигналов устанавливались в предыдущее значение, при котором модуль оставался полностью работоспособным, а наблюдаемое изображение не имело дефектов.

3.4 Оценка дальности действия макета разрабатываемой активно-импульсной системы

Многие технические характеристики приборов наблюдения часто являются взаимосвязанными, причем улучшение одних неизбежно влечет ухудшение других. Например, увеличение дальности наблюдения при постоянной массе приводит к уменьшению поля зрения, а увеличение дальности при постоянном поле зрения ведет к увеличению массогабаритных характеристик за счет использования объектива большего размера.

Другим примером является мощность лазерного излучателя и энергопотребление прибора. По этой причине технические характеристики часто выбираются не максимально возможными, а компромиссными, исходя из назначения прибора и условий его эксплуатации.

В нашем случае компромиссными характеристиками являются дальность действия прибора (дальность подсветки) и поле подсветки, причем поле подсветки по возможности должно совпадать с полем зрения прибора.

Расчет дальности произведем исходя из следующих условий:

- используется интерференционный фильтр;
- дальность действия ограничивается контрастом цели на ярком фоне;
- цель точечная, а фон протяженный.

Ослабление пучка света лазерного излучателя при распространении его в атмосфере в общем виде описывается законом Бугера-Ламберта-Бера [122] и выражается формулой

$$I(L) = I_0 \cdot \exp(-k_\lambda L),$$

где I_0 – интенсивность света, прошедшего через слой поглощающей среды толщиной L , а k_λ – показатель поглощения, определяемый свойствами среды и зависящий от длины волны поглощаемого света.

Так как оптические свойства атмосферы являются нестабильными и зависят от многих факторов, таких как окружающая температура, давление, молекулярный состав атмосферы в данной области и т.д., конкретный коэффициент подобрать не представляется возможным, и поэтому используется усредненный не имеющий размерности коэффициент пропускания атмосферы τ_a для заданной длины волны, полученный экспериментальным путем. Для длины волны 905 нм и предполагаемой дальности использования около 1 км $\tau_a \approx 0,5$ [123].

Коэффициент пропускания приемного объектива, в нашем случае равный $\tau_{об} = 0,8$, рассчитывается при разработке конкретного объектива, либо берется из паспорта.

При длительности единичного импульса лазерного излучателя $t_{имп} = 150$ нс и при минимальном времени экспозиции при наблюдении единичного импульса, равном, в свою очередь, $t_э = 1$ мкс (обоснование данной величины приведено в четвертой главе диссертации), средняя мощность излучателя за время экспозиции с учетом импульсной мощности лазерного излучателя $P_{имп} = 260$ Вт [94] равна

$$P_{cp} = P_{имп} \cdot \frac{t_{имп}}{t_э} = 260 \cdot \frac{150}{1000} = 39 \text{ [Вт]}$$

Коэффициент использования излучения оптической системой излучателя при этом оценочно примем равным $k_{исп} = 0,75$, считая, что объектив излучателя оставит 75% потока излучения. При этом коэффициент потери потока фотоприемником на длине волны 905 нм составляет $k_{фп} = 0,2$, что следует из

графика спектральной чувствительности используемой ПЗС-матрицы [89]. Из [89] также взят размер фоточувствительного элемента, одинаковый по ширине и высоте $s = 3,75$ мкм.

Так как объектив излучателя имеет переменное фокусное расстояние для расчета можно взять его среднее значение $F_{изл} = 5$ мм – предоставлено разработчиками объектива. При размерах излучающей площадки лазерного излучателя $x = 0,33$ мм и $y = 0,2$ мм [94] угловые размеры пятна подсветки составят

$$\varphi_x = \text{atan}\left(\frac{x}{F_{изл}}\right) = \text{atan}\left(\frac{0,33}{5}\right) = 3,8^\circ$$

и

$$\varphi_y = \text{atan}\left(\frac{y}{F_{изл}}\right) = \text{atan}\left(\frac{0,2}{5}\right) = 2,3^\circ$$

Относительное отверстие приемного объектива $O = 0,2$, полоса пропускания интерференционного фильтра $B_\lambda = 50$ нм.

Показатель световозвращения цели (ПСВ), за которую принят прицел ПСО-1, измерен методами, описанными в [124], $R = 20$ м²/ср. При этом спектральная плотность яркости фона для освещенности «яркий день» составляет $E_\lambda = 10^3$ Вт/(м² · мкм) [29]. А пороговое отношение сигнал/фон, необходимое для распознавания блика от цели, составляет $S_{нор} = 5,5$ [125].

Поток от фона на элемент фотоприемника размерами $s \times s$ составляет

$$P_\phi = \frac{E_\lambda \cdot s^2}{4} \cdot O^2 \cdot B_\lambda$$

при этом поток, отраженный целью на этот же элемент фотоприемника за заданное время экспозиции равен [126]:

$$P_u(L) = 0,25\pi \cdot R \cdot P_{ср} \cdot d_{вх}^2 \cdot \tau_a^2(L) \cdot \left(\frac{f_u^2}{L^4}\right) \cdot \frac{k_{фн} \cdot k_{исп} \cdot \tau_{об}}{x \cdot y}$$

Решение уравнения

$$\frac{P_u(L)}{P_\phi} = S_{нор}$$

аналитическими методами, например, при использовании программного обеспечения Mathcad, Maple или аналогичного, дает решение $L = 845,6$ м.

График отношения $P_u(L)$ к P_ϕ в зависимости от дальности L в логарифмическом масштабе по оси ординат имеет вид, представленный на рис. 44. Дополнительно на графике показано значение их порогового отношения.

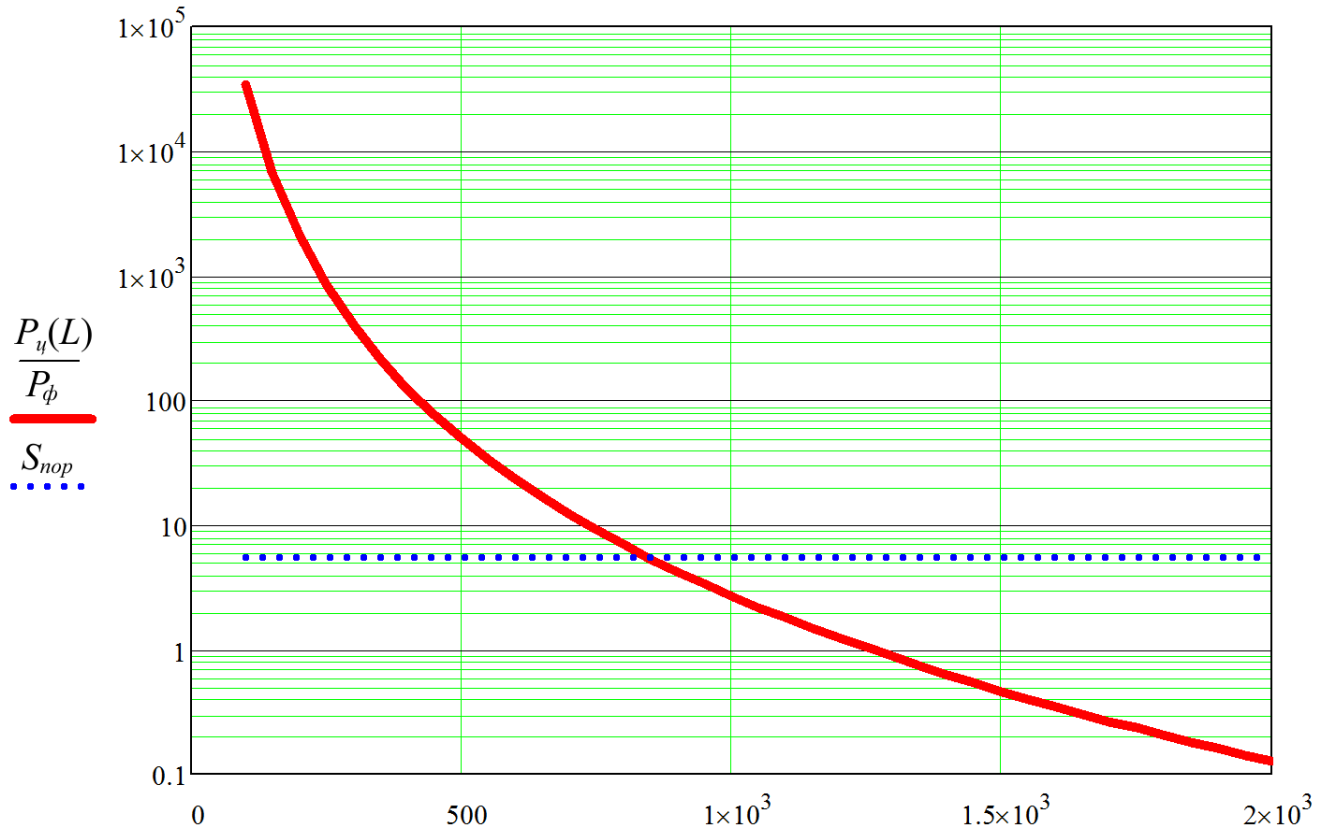


Рисунок 44 – График зависимости отношения $P_u(L)$ к P_ϕ от дальности L

При изменении фокусного расстояния объектива излучателя в диапазоне от 4 мм до 8 мм, значение дальности L , соответствующее пороговому отношению $P_u(L)$ к P_ϕ , найденное описанным способом, варьируется от 761 м до 1055 м.

Основные результаты третьей главы

1. Разработан действующий макет активно-импульсного прибора наблюдения, который использовался в качестве лабораторного стенда для исследования поведения ПЗС-матрицы при управлении ею предложенным недокументированным способом.

2. Спроектированы аппаратно-программные модули, которые в дальнейшем могут быть использованы при разработке перспективных цифровых малогабаритных активно-импульсных приборов наблюдения или комплексированных систем.

3. Предложенные алгоритмы управления ПЗС-матрицей для осуществления метода наблюдения со стробированием и комбинированного режима наблюдения реализованы программно на ПЛИС, программный код написан на языке описания аппаратуры System Verilog.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИБОРА НАБЛЮДЕНИЯ БЕЗ ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В главе приведены результаты экспериментов, подтверждающие реализуемость предложенного способа построения активно-импульсной системы на основе ПЗС-матрицы со строчным переносом без использования электронно-оптического преобразователя. Подтверждена эффективность использования цифрового активно-импульсного прибора наблюдения для поиска оптических устройств на местности по их бликам и применимость прибора в условиях ограниченной видимости.

4.1 Предпосылки проведения экспериментов

Проведение экспериментов на разработанном макете активно-импульсной системы преследовало две цели. Во-первых, необходимо было экспериментальным путем подтвердить работоспособность предложенного способа управления ПЗС-матрицей со строчным переносом в части возможности использования ее секции вертикального переноса зарядов в качестве секции суммирования отдельных кадров изображения.

Во-вторых, необходимо было подтвердить практическую применимость указанного способа. То есть убедиться, что качество наблюдаемых изображений является достаточным для восприятия оператором, а скорость получения кадров изображения адекватна процессу наблюдения и составляет не менее 25 кадров/с [127, 128].

Кроме этого, необходимо было убедиться, что предложенный метод управления ПЗС-матрицей осуществим не только на конкретной модели ПЗС-фотоприемника, а на нескольких различных матрицах.

По этой причине проверка работоспособности осуществлялась на нескольких имевшихся в распоряжении ПЗС-фотоприемниках со строчным переносом. Среди них матрицы производства Sony ICX618AL, ICX445ALA и

ICX692ALA-F с прогрессивной разверткой, ICX659ALA и ICX279AL с чересстрочной, а также некоторые другие.

Под каждую из указанных ПЗС-матриц пришлось разработать собственную аппаратно-зависимую плату фотоприемника, так как все они имеют разные корпуса, для управления ими необходимо разное количество сигналов, и разные напряжения питания.

Также понадобились незначительные изменения кода программы на языке Verilog для программируемой логической интегральной схемы, расположенной на плате ERCS, в части формирования управляющих сигналов вертикальной и горизонтальной развертки.

Иных изменений или доработок, касающихся модификации кода программы, соответствующего тракту обработки видеопотока, не потребовалось.

4.2 Экспериментальная апробация предложенного способа управления ПЗС-матрицей при наблюдении бликующих объектов

Для подтверждения способности суммирования отдельных кадров изображения в секции ПЗС-фотоприемника, предназначенной изначально для вертикального переноса зарядов, был проведен следующий эксперимент. Автоматическая цифровая нормировка яркости изображения была отключена. Осуществлялось наблюдение сцены, не содержащей отражающие объекты, при подсветке 5 импульсами, 10, 20 и т.д. с одного и того же расстояния. Кроме того, осуществлялось наблюдение с неподключенным лазерным излучателем, но при этом с формированием управляющих импульсов ПЗС-матрицей, соответствующих активно-импульсному режиму наблюдения. Затем эксперимент повторялся для других расстояний.

Итоговые кадры изображений сохранялись на персональном компьютере в цифровом виде и поэлементно сравнивались друг с другом. Результаты сравнения показали, что при возрастании числа импульсов лазерного излучателя до некоторого порогового значения пропорционально возрастает яркость фона.

Пороговое значение зависело от окружающей освещенности и для одних условий оно составило 400 импульсов (500 лк, пасмурный день в тени, освещенное помещение), для других – 100 импульсов (облачный день, до 3000 лк), для третьих – 40 импульсов (открытая местность, 10000 лк) и т.д. При достижении порогового значения, отдельные фрагменты кадра изображения или кадр целиком оказывались пересвеченными, что могло бы сказаться на достоверности измерений в ходе проведения эксперимента.

При сравнении кадров в ходе эксперимента инструментально оценивались отношения средних яркостей \bar{B} кадров изображения, наблюдавшихся при различном числе импульсов лазерного излучателя. Для каждого отдельного кадра эта величина равна

$$\bar{B} = \frac{1}{w \cdot h} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h B_{x,y},$$

где $B_{x,y}$ соответствует яркости каждого отдельного пикселя с координатами (x, y) , w – ширина кадра, h – его высота.

Среднее квадратическое отклонение яркости для кадра при это равно:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h (B_{x,y} - \bar{B})^2}{w \cdot h}}$$

Отношение Z средних яркостей для кадров, полученных при различном числе импульсов лазерного излучателя N равно:

$$Z = \frac{\bar{B}(N_1)}{\bar{B}(N_2)}$$

По очевидным причинам оно совпадает со значением отношения суммарных яркостей двух кадров, имеющих одинаковую длину и ширину.

Эксперименты показали, что для каждой группы однотипных кадров (снятых в одинаковых условиях) для всех N , отличных от 1, независимо от самих условий и дальности наблюдения, справедливо соотношение

$$Z = \frac{\bar{B}(N_1) \pm \delta(N_1)}{\bar{B}(N_2) \pm \delta(N_2)} \approx \frac{N_1}{N_2}$$

Пропорциональность изменения яркости в зависимости от числа импульсов лазерного излучателя, или, что эквивалентно, от числа одинаковых последовательностей импульсов стирания и считывания, показывает то, что заряды отдельно полученных кадров изображения, но не перемещенных вертикально, действительно суммируются. Эта особенность позволяет повысить яркость изображения путем наблюдения подряд отраженного света от нескольких импульсов лазерного излучателя без применения в конструкции активно-импульсного прибора ЭОП в качестве усилителя яркости.

Пропорциональность изменения среднего значения яркости характерна не только для всего кадра, но также для его отдельных фрагментов. Например, для фрагмента размером 100×100 пикселей в окрестности наблюдаемого блика отраженного лазерного излучения также справедливо выражение

$$\frac{\overline{B_{\text{фр}}}(N_1) \pm \delta_{\text{фр}}(N_1)}{\overline{B_{\text{фр}}}(N_2) \pm \delta_{\text{фр}}(N_2)} \approx \frac{N_1}{N_2},$$

где $\overline{B_{\text{фр}}}(N)$ – это средняя яркость в указанном фрагменте, посчитанная для кадра изображения, полученного в результате наблюдений N импульсов, а $\delta_{\text{фр}}(N)$ – среднеквадратическое отклонение яркости этого фрагмента.

Проведенные эксперименты также позволили определить необходимое количество импульсов лазерного излучения для наблюдения в различных условиях окружающей освещенности. Они показали, что для устойчивого наблюдения бликов от катафотов в условиях освещенности «день» (от 4000 лк до 50000 лк) на расстоянии 100 метров оказалось достаточно количества от 15 до 20 импульсов подсветки длительностью 150 нс каждый (при мощности излучателя 200 Вт на импульс). В этом случае блики оказывались различимы на наблюдаемом изображении, не сливались с фоном и не оказывались пересвеченными. Меньшее число импульсов, а, соответственно, и меньшее время экспозиции суммарного кадра приводит к ухудшению изображения, что связано с недостаточным отношением сигнал/шум для отдельных пикселей или фрагментов изображения, на которые попали затененные участки сцены.

Эксперименты показали, что в условиях достаточной освещенности необходимое число импульсов лазерного излучателя не зависит ни от окружающей освещенности, ни от дальности наблюдения. Причина заключается в неизменности отношения сигнал/фон в зависимости от числа импульсов.

Ни увеличение, ни уменьшение числа импульсов лазерного излучателя не приводит к увеличению/уменьшению отношения сигнал/фон. Так как в момент наблюдения отраженного импульса лазерного излучателя также осуществляется наблюдение отраженного от фона солнечного света, то при увеличении числа импульсов также пропорционально их числу увеличивается время экспозиции фона, и отношение яркости блика к яркости фона в итоге остается неизменным. При уменьшении числа импульсов, время экспозиции фона также пропорционально уменьшается. Другими словами, отношение сигнал/фон является константным и не зависит от числа импульсов лазерного излучателя.

Но при этом уменьшение числа импульсов лазерного излучателя приводит к уменьшению отношения сигнал/шум, что в условиях пониженной освещенности (например, до 200 лк и менее) приводит к существенному ухудшению качества наблюдаемого изображения с точки зрения оператора. А увеличение числа импульсов в условиях повышенной освещенности, например, в диапазоне от 50000 лк до 100000 лк, может приводить к пересвету изображения из-за избыточного времени экспозиции фона для текущих условий наблюдения. В этом случае число импульсов лазерного излучателя следует уменьшать до тех пор, пока наблюдаемое изображение не окажется непересвеченным, а главным препятствием для наблюдения отраженного лазерного импульса становится яркий фон, который начинает маскировать наблюдаемые блики.

Отношение сигнал/фон не может быть изменено путем изменения числа импульсов лазерного излучателя, так как его невозможно увеличить отдельно от увеличения времени экспозиции фона. Для устранения проблемы в виде маскирования блика фоном при наблюдении следует отсекал солнечный свет, например, путем применения комбинированных спектральных фильтров, пропускающих свет исключительно на длине волны лазерного излучателя.

Эксперименты показали, что применение фильтра в условиях повышенной освещенности позволяет не менее, чем в десять раз подавить яркость изображения фона относительно яркости изображения наблюдаемого блика.

При пониженной освещенности число импульсов увеличивается, но не с целью увеличения суммарной яркости блика, а с целью увеличения экспозиции фона. При наблюдении в условиях пониженной освещенности помимо времени экспозиции на яркость фона также существенно влияет свет лазерного излучателя.

При проведении наблюдений следует учитывать тот факт, что интенсивность наблюдаемого отраженного света лазерного излучателя падает пропорционально 4 степени расстояния до наблюдаемых объектов [129], а интенсивность объектов фона, освещенных солнечным светом, звездами или Луной, обратно пропорциональна 2 степени расстояния до них при наблюдении в условиях прозрачности атмосферы. Поэтому при наблюдении на близкие расстояния в целом требуется меньшее число импульсов лазерного излучателя, чем при наблюдении на более дальние.

Зависимость минимального числа импульсов от расстояния и от окружающей освещенности не может быть аппроксимирована некой функцией. Причина заключается в том, что в условиях низкой освещенности помимо изменения отношения сигнал/шум и отношения сигнал/фон на обнаружение бликующих объектов начинает влиять не только мощность и длительность воздействия подсветкой, но еще и трудноизмеримые физиологические особенности восприятия изображения конкретным оператором.

Как показали эксперименты, чаще всего удобнее оказывается установить максимально возможное число импульсов лазерного излучателя, не сказывающееся на кадровой частоте наблюдаемого изображения, и при этом включить автоматическую нормировку яркости и контраста изображения, передаваемого на дисплей прибора. При изменении условий наблюдения, например, при резком увеличении окружающей освещенности, и при соответствующем изменении наблюдаемой картины на дисплее прибора оператор изменяет необходимое число импульсов, устанавливая не конкретные, заранее

выбранные значения, а подбирает их эмпирически, увеличивая или уменьшая число импульсов лазерной подсветки до тех пор, пока наблюдаемое изображение не станет наиболее комфортным для восприятия.

В ходе экспериментов кадровая частота для всех исследуемых ПЗС-матриц составляла не менее 25 Гц, при числе импульсов подсветки, не превышавшем 150. Дальнейшее увеличение числа импульсов приводило к снижению кадровой частоты из-за того, что используемый лазерный излучатель не мог осуществлять подсветку чаще, чем с частотой 15 кГц. Максимально допустимое время подсветки составляло:

$$t = 150 / 15 \text{ кГц} = 10 \text{ мс},$$

так как время, затрачиваемое на вертикальный и горизонтальный переносы зарядов при выводе кадра изображения составляет 30 мс, а общее время, затрачиваемое на один кадр при кадровой частоте 25 Гц, не может превышать значение 40 мс. При этом, ПЗС-матрица ICX445ALA для повышения кадровой частоты управлялась в режиме «центрального окна» с разрешением 1280×600 точек изображения, остальные исследуемые ПЗС-фотоприемники управлялись в полнокадровом режиме.

При наблюдении в условиях пониженной освещенности (менее 50 лк) экспериментально выявилась необходимость наблюдения фона отдельно от бликующих объектов, так как число импульсов лазерного излучателя оказывалось достаточным и даже избыточным для детектирования отражающих объектов, но при этом на изображении был совершенно не различим фон. Пример подобного изображения был приведен в разделе 2.2 диссертации на рис. 15. Данная проблема была устранена модификацией алгоритма управления ПЗС-матрицей путем комбинирования пассивного режима наблюдения с активно-импульсным, о чем более подробно написано в разделе 2.2.

Дальнейшая экспериментальная апробация модифицированного алгоритма управления ПЗС-фотоприемником также подтвердила его применимость при наблюдении в условиях окружающей освещенности ниже 200 лк. В пограничных условиях 50...100 лк наблюдения могут производиться в обоих режимах.

Пример полученного изображения в комбинированном режиме управления ПЗС-матрицей представлен на рис. 45. На рисунке окружностями отмечены наблюдаемые катафоты, размещенные на расстояниях 100, 170 и 200 м от наблюдателя при установленной дальности наблюдения 100 метров.



Рисунок 45 – Наблюдение бликов от катафотов, расположенных на расстояниях 100 м (левый), 170 м и 200 м (правые)

В момент наблюдения приведенного кадра окружающая освещенность составляла около 5 лк (окружающие условия: зимний пасмурный вечер, частичное освещение Луной). Блики устойчиво наблюдались при подсветке местности 5–10 импульсами лазера. При увеличении числа импульсов подсветки более 10 штук, ближайший к наблюдателю отражающий объект становился пересвеченным. При уменьшении числа импульсов менее 5 штук, дальние блики продолжали наблюдаться, но оказывались слабо различимыми.

Элементы фона, наблюдаемого на указанных расстояниях хотя и являются подсвеченными при использовании лазерного излучения, но выглядят темными из-за их слабых показателей световозвращения. На приведенном изображении основной вклад в яркость каждого из объектов фона вносит естественный свет, накопленный за счет существенного увеличения времени экспозиции в пассивном режиме, в то время как вклад света от лазерного излучателя в яркость объектов фона пренебрежимо мал.

Помимо подтверждения способности ПЗС-матрицы со строчным переносом суммировать «в зарядовом виде» отдельные кадры изображения до их вертикального перемещения необходимо было также экспериментально подтвердить способность работы ПЗС-матрицы в активно-импульсном режиме. Реализация метода наблюдения со стробированием, то есть способность отсекал свет лазерной подсветки, отраженный от объектов, которые находятся ближе заданного расстояния, проверялась следующим образом.

В экспериментах роль наблюдаемых объектов играли катафоты, которые были установлены на различных относительно устройства наблюдения дистанциях. В ходе экспериментов поочередно устанавливались различные значения расстояния подсветки, или, другими словами, регулировалось время задержки между срабатыванием лазерного излучателя и подачей управляющих считыванием и стиранием зарядов ПЗС-матрицы импульсов. Затем и визуально, и программными методами проверялось, будут ли видны на изображении блики от наблюдаемых катафот, если установить дальность подсветки, превышающую заранее известное расстояние до конкретного катафота.

Например, при дальности подсветки 400 метров наблюдались блики от катафотов, находившихся на расстоянии более 400 метров, а объекты, которые располагались на расстояниях 100, 200, 300 метров, не бликовали. Таким образом, была подтверждена работоспособность предложенного метода управления ПЗС-матрицей.

Под понятием «видно блик» при оценке изображения программным методом подразумевается детектирование изменения яркости изображения в окрестности точки, заранее определенной как место нахождения бликующего объекта. Изменение яркости при этом может быть малым по сравнению с исходной яркостью и незаметным для человеческого глаза. Оператор в приложении отмечает на наблюдаемом изображении окрестность, где должен находиться блик. Затем осуществляется серия наблюдений с применением периодической подсветки, в ходе которой оператор изменяет расстояние подсветки.

Приложение в автоматическом режиме считывает кадры изображения в реальном времени и производит попиксельное вычисление прироста яркости каждого последующего кадра по сравнению с предыдущим. Далее для каждого кадра строится двумерное распределение величины прироста яркости $\Delta_{x,y}(n)$, где n – номер кадра. Прирост может быть отмечен как в абсолютных величинах, соответствующих разнице яркостей пикселя двух кадров:

$$\Delta_{x,y}(n) = B_{x,y}(n) - B_{x,y}(n-1)$$

так и в относительных – прирост яркости в процентах:

$$\Delta_{x,y}(n) = \frac{B_{x,y}(n) - B_{x,y}(n-1)}{B_{x,y}(n)}$$

Во втором случае распределение оказывается более наглядным и более простым для интерпретации программным обеспечением. Например, можно задать порог срабатывания автомата определения наличия/отсутствия блика – изменение яркости пикселя на 5% и более в серии из 10 кадров, в каждом четном положительный прирост, а в каждом нечетном отрицательный. Такой подход исключается ложное определение блика при наличии прироста (или уменьшения) яркости в каждом из кадров, а не только в четном (нечетном), за счет естественного изменения освещенности сцены.

Для наглядности распределение может быть также представлено в графическом виде как изображение, размеры которого совпадают с размерами исходных кадров изображения, на котором в полутонах одного цвета отмечен прирост яркости каждого пикселя последующего кадра относительно предыдущего, если прирост положительный, и в полутонах другого цвета, если прирост отрицательный.

Пример приведен на рис. 46. Как видно из рисунка, распределение, получаемое в результате вычитания одного кадра из другого, содержит характерную точку – блик, соответствующий изображению катафота. Помимо него, на изображении находятся другие темные и светлые точки, соответствующие пикселям, на которых также произошло изменение яркости от

одного кадра к другому, но на которых это изменение не превысило пороговое значение в 5%. Изменение яркости может быть связано с незначительным изменением положения объектов, составляющих фон, а также с шумом фотоприемника.

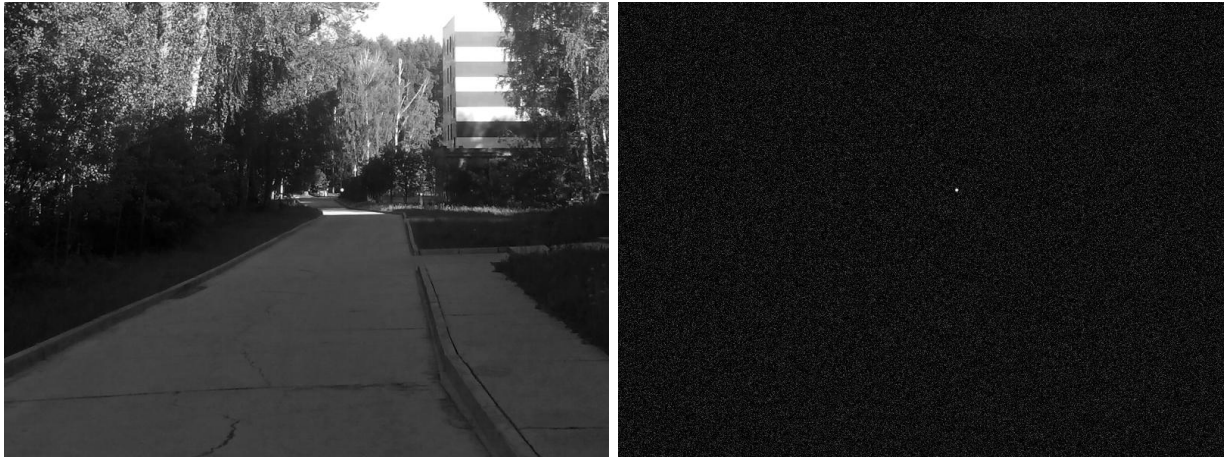


Рисунок 46 – Исходный n -кадр (слева) и результат вычитания $(n - 1)$ -ого кадра из n -ого (справа)

Демонстрация возможности стробирования в экспериментах сводится к наблюдению бликов на различных дистанциях и проверке того, что при установке дальности наблюдения, превышающей заведомо известное расстояние до установленного катафота, этот катафот перестает давать блик. И, наоборот, при уменьшении дальности наблюдения до значения, меньшего дальности нахождения катафота (в пределах глубины просматриваемого пространства), он начинает бликовать, что детектируется программным обеспечением.

Примеры изображений, полученных при проведении экспериментов непосредственно оператором, приведены на рис. 47. При проведении наблюдений непосредственно оператором подсветка была постоянной, а не периодической, либо была периодической, но при этом период мигания составлял величину, существенно превышавшую длительность кадра – около 1 секунды. На левом скриншоте демонстрируется наблюдение бликующего объекта, расположенного на расстоянии 400 метров от наблюдателя при установленной дальности 320...350 метров. На правом скриншоте наблюдаются два отражающих объекта, один из

которых находится на дистанции 400 метров, а другой на дистанции 300 метров, при этом дальность наблюдения установлена 290 метров.

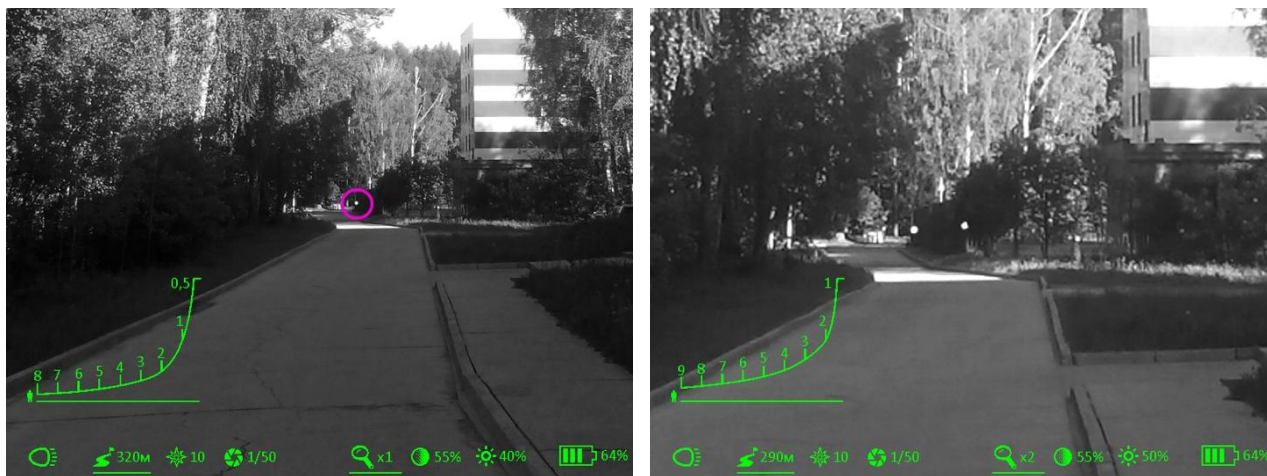


Рисунок 47 – Наблюдение бликов от катафотов, расположенных на разных дистанциях. Пояснения в тексте

Наблюдаемые объекты выглядят точечными, поэтому на статической картинке на рис. 47 слева для большей заметности блик дополнительно обведен окружностью. При наблюдении непосредственно на дисплее прибора объект выглядит мигающим, за счет чего он сразу же привлекает внимание.

На рис. 47 справа изображение приведено увеличенным электронным способом в два раза, поэтому оба блика выглядят крупными. Яркость изображения также увеличена, что видно из статусной строки, отображенной внизу.

Отдельно следует указать, что при масштабировании увеличивается только изображение наблюдаемой сцены. Текст, пиктограммы и диалоговые окна на дисплее прибора свои размеры не меняют. При этом угловые и дальномерные шкалы автоматически адаптируются под новые размеры изображений путем изменения шага шкалы и ее подписей.

Из рис. 47 отчетливо видно, что при установленной дальности более 300 метров объект, который находится ближе этой дистанции, перестает быть виден. То есть свет, отраженный от него, оказывается отсеченным, что и демонстрирует работоспособность предложенного метода наблюдения со стробированием по

дальности, реализованного на ПЗС-матрице со строчным переносом без использования внешнего затвора на основе ЭОП.

При этом качество наблюдаемого изображения и хорошая различимость элементов фона указывают на отсутствие необходимости использования в составе активно-импульсного устройства усилителя яркости в качестве дополнительного элемента.

4.3 Изменение глубины просматриваемой зоны

В общем случае, глубина просматриваемой зоны равна половине расстояния, которое свет лазерного излучателя успевает пройти за время экспозиции единичного кадра. Время экспозиции при этом составляет время от заднего фронта импульса стирания до заднего фронта импульсов считывания.

Документацией на ПЗС-фотоприемники предписывается обеспечение определенных длительностей управляющих импульсов, обеспечивающих перемещение зарядов из секции накопления в секцию вертикального переноса. Например, для ПЗС-матрицы ICX445 [78] рекомендуемое время, в течение которого к управляющим сигналам V2/V3 приложено напряжение +15V, составляет 1,72 мкс, а минимальное 1,52 мкс при длительностях фронтов 0,5 мкс.

Указанное время избыточно для наблюдения единичного импульса лазерного излучателя, длительность которого составляет всего 150 нс, поэтому для обеспечения лучшего соотношения сигнал/фон при наблюдении отклика лазерного излучателя целесообразно уменьшить экспозицию единичного кадра, в том числе за счет уменьшения длительности импульсов считывания.

В противном случае, глубина просматриваемой зоны составляет значительное расстояние, равное половине расстояния, проходимого светом за данное время, и при длительности 1,7 мкс равно:

$$L \approx 1,7 \cdot 10^{-6} [\text{с}] \cdot 3 \cdot 10^8 [\text{м/с}] / 2 \approx 255 [\text{м}]$$

Эксперименты показали, что импульсы считывания на входы V2/V3 могут подаваться синхронно, с совпадающими передним и задним фронтами без

ухудшения качества наблюдаемого изображения, в то время как документацией предписывается обеспечить запаздывание одного фронта относительно другого на величину порядка 120 нс.

Кроме того, длительность самого импульса амплитудой +15 В может быть уменьшена. Существенное уменьшение приводит к появлению дефектов на изображении в виде черных точек и кластеров (пример представлен на рис. 48), что связано с неодинаковостью скорости переноса зарядов из одной секции в другую для различных пикселей.

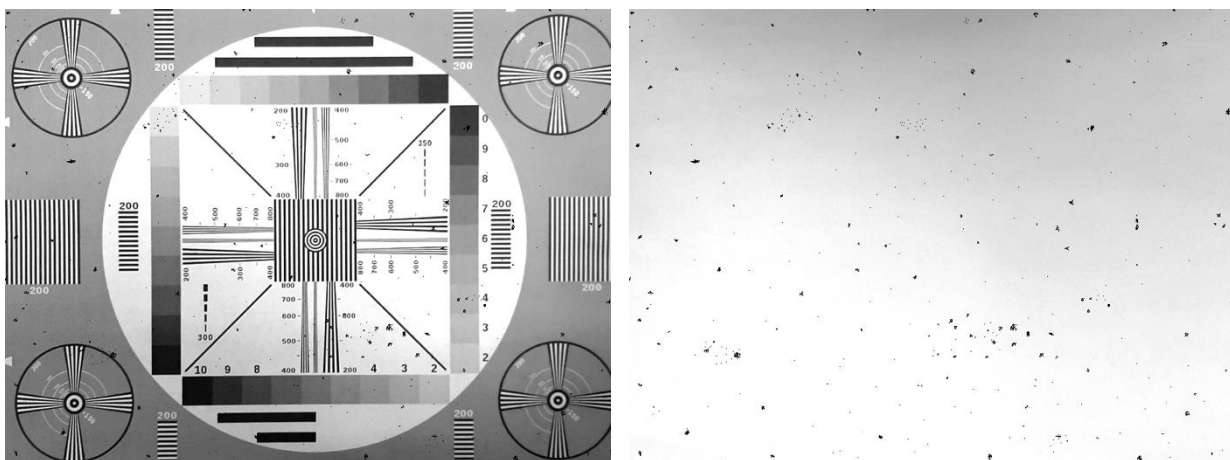


Рисунок 48 – Появление дефектов на изображении. Пояснения в тексте

Как видно из рис. 48, дефекты не мешают наблюдению при наличии неоднородного фона (изображение слева), вместе с тем, они хорошо заметны на светлом однородном фоне (изображение справа). По этой причине в дальнейшем для экспериментов был выбран светлый однородный фон как более подходящий для визуального поиска черных точек или подтверждения их полного отсутствия. Изображение тест-таблицы также использовалось при проведении экспериментов, как более наглядное для демонстрации негативного влияния «черной крапинки» на визуальное восприятие и распознавание мелких деталей оператором.

Эксперименты показали, что дефекты проявляются в одних и тех же местах на изображении независимо от фона. Яркость условно дефектного пикселя не зависит от истинной яркости изображения объекта, оказавшегося на месте указанного пикселя.

В общем случае, ни увеличение, ни уменьшение времени экспозиции путем увеличения или уменьшения времени от заднего фронта импульса стирания до заднего фронта импульса считывания при постоянной длительности импульсов считывания не влияет ни на появление или исчезновение «черной крапинки», ни на ее яркость.

На появление «черной крапинки» влияет исключительно длительность импульса считывания – при ее уменьшении точек и кластеров поверх изображения фона становится больше. Так, изображения, представленные на рис. 48, были получены на матрице ICX445 при длительности импульса считывания 850 нс. Изображения, представленные на рис. 49, получены на этой же матрице, но при длительности импульса считывания 750 нс.

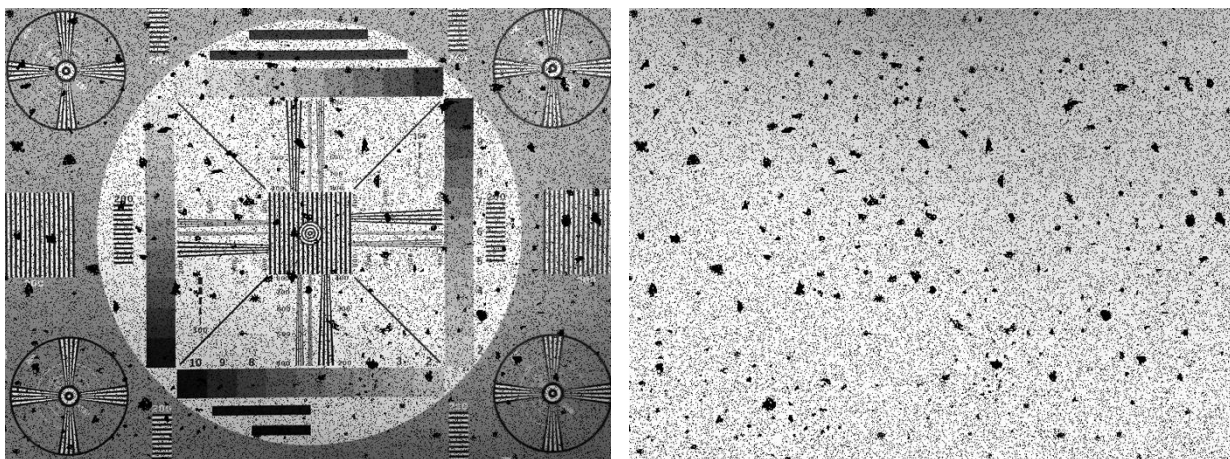


Рисунок 49 – Появление дефектов на изображении при уменьшении длительности импульсов считывания. Слева – неоднородный фон, справа – однородный фон.

Как видно из изображений, к имеющимся черным точкам и кластерам добавились новые, в результате распознавание элементов неоднородного фона оказалось затруднительным. При последующем уменьшении длительности импульсов считывания черных точек и кластеров становится настолько много, что фон становится практически не различимым.

На рис. 50 показаны графики отношений величин числа «хороших» пикселей (не занимаемых крапинкой) на изображении $S_{ХОР}$, к числу всех пикселей изображения S в зависимости от длительности t приложенного импульса

считывания для трех различных ПЗС-матриц из одной партии, полученные экспериментально.

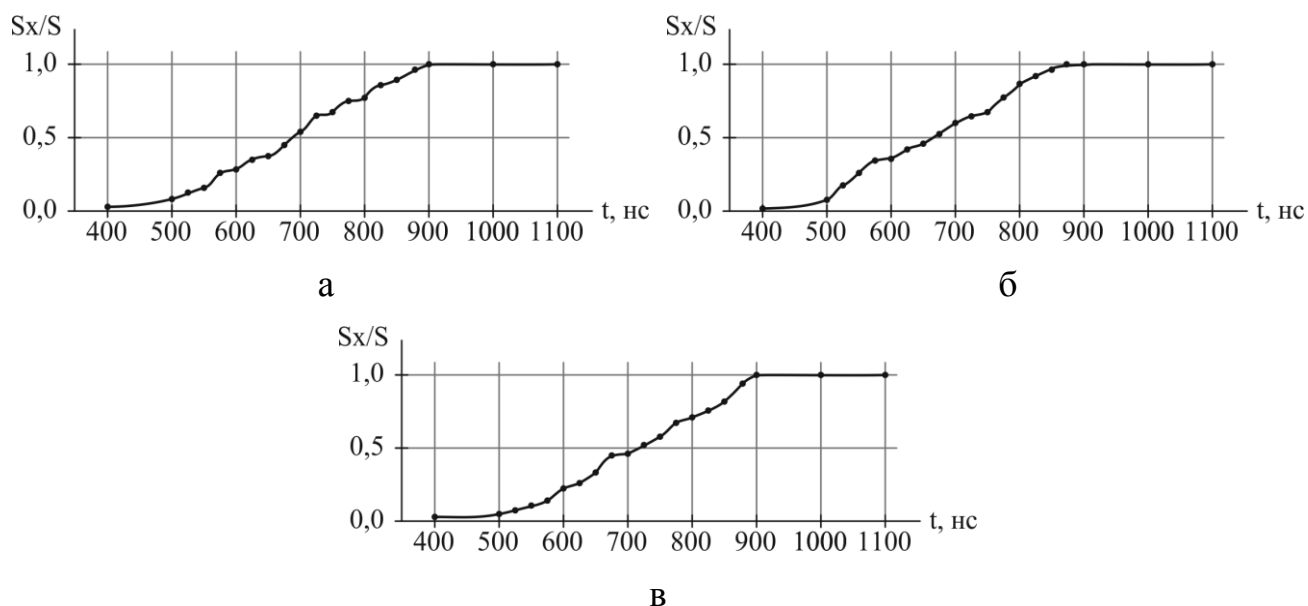


Рисунок 50 – Отношение числа «хороших» пикселей к числу всех пикселей изображения в зависимости от длительности импульса считывания.

Под дефектными пикселями в эксперименте понимались такие пиксели, на которых не наблюдалась истинная яркость элементов изображения. Например, при однородном белом фоне, данные пиксели выглядели аномально темными.

При оценке кадра в каждом конкретном случае пиксель принимался за темный, если его яркость $B_{x,y}$ не превышала величину, составляющую половину от максимально возможной яркости B_{\max} . Например, для 8-битных пикселей, эта величина в целочисленном представлении составляет $0,5 \cdot 255 \approx 127$. Фон при этом подбирается таким, чтобы яркость элементов его самого темного участка заведомо превышала указанную величину.

При заданных длине и ширине кадра, равных w и h соответственно, общее число пикселей равно:

$$S = w \cdot h,$$

из них число «хороших» пикселей:

$$S_{XOP} = \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^h n_{x,y},$$

где

$$n_{x,y} = \begin{cases} 1, & B_{x,y} \geq 0,5 \cdot B_{\max} \\ 0, & B_{x,y} < 0,5 \cdot B_{\max} \end{cases}$$

Минимальная длительность импульсов считывания, обеспечивающая качественную картинку без «черной крапинки» во всех условиях наблюдения для нескольких ПЗС-матриц ICX445 из различных партий была определена экспериментально и составила 900 нс. Это время соответствует глубине просматриваемой зоны:

$$L \approx 900 \cdot 10^{-9} [\text{с}] \cdot 3 \cdot 10^8 [\text{м/с}] / 2 \approx 135 [\text{м}]$$

Вместе с тем, для задач поиска бликующих объектов на местности часто бывает целесообразно увеличить глубину просматриваемого пространства для ускорения поиска целей, поэтому в макете активно-импульсного прибора наблюдения дополнительно была введена возможность изменения глубины в сторону увеличения ее значения. В частности, глубина просматриваемой зоны может составлять 200 м, 300 м, 400 м, и т.д. в зависимости от конкретной задачи. Пользователь указывает желаемое значение в метрах, при этом длительность экспозиции в тактах ПЛИС рассчитывается автоматически.

Увеличение глубины просматриваемой зоны достигается увеличением времени экспозиции при наблюдении единичного импульса лазерного излучателя. Максимальная длительность импульса считывания при этом составляет 1,5 мкс. При необходимости увеличения времени экспозиции до величин, превышающих это значение, происходит увеличение длительности между задним фронтом импульса стирания и передним фронтом импульсов считывания.

Неодинаковость скорости перемещения зарядов разными пикселями и неодинаковость применения импульса стирания ко всем пикселям, строго говоря, не дает возможности утверждать, что наблюдаемые блики получены с конкретного расстояния. Например, при установленной дальности наблюдения 100 м, часть пикселей могут получать свет, отраженный от предметов с расстояния $100 + \Delta_1$ м, а часть – с расстояния $100 - \Delta_2$ м. На точности дальности также сказывается дискретность изменения шага дальности в 10 нс, являющегося

длительностью одного такта ПЛИС, на которой реализован модуль тактирования ПЗС-матрицы. Кроме того, скорости распространения сигналов стирания и считывания внутри самой ПЗС-матрицы не поддаются прямым измерениям и являются неизвестными.

Компенсация перечисленных источников неопределенностей установления истинного расстояния подсветки происходит путем внесения калибровочных данных на этапе юстировки и калибровки прибора. Калибровка требуется один раз за все время эксплуатации прибора. Эксперименты показали, что разброс расстояний подсветки, по которым косвенно можно определить дальность до бликующих объектов не превышает величину 5 м на расстояниях до объектов в диапазоне от 200 до 800 м.

4.4 Улучшение способности обнаружения отражающих объектов

Экспериментально была установлена необходимость мигания подсветки для повышения скорости обнаружения бликующих объектов.

Сам лазерный излучатель светит короткими импульсами длительностью не более 150 нм и частотой повторения 10–15 кГц, но они воспринимаются человеческим глазом как непрерывное свечение. При этом оператору оказывается трудно и не всегда возможно определить, наблюдает ли он точечный объект именно в результате его подсветки активно-импульсным прибором наблюдения, или же наблюдаемое пятно светится независимо от подсветки прибором, например, из-за солнечных лучей, являясь в том числе не объектом, интересующим оператора, а элементом ландшафта.

Трудность поиска точечной цели наглядно демонстрирует статичное изображение, приведенное на рис. 51. Это то же самое изображение, которое приведено на рис. 47 слева, но на нем наблюдаемый блик от отражающего объекта-цели не обведен, поэтому его быстрое обнаружение и на дисплее прибора, и на приведенной иллюстрации затруднительно.



Рисунок 51 – Наблюдение блика в виде точечного объекта

Для большей заметности объектов, потенциально интересующих наблюдателя, для увеличения скорости их обнаружения и с целью исключения ложноположительных и ложноотрицательных результатов поиска в макет активно-импульсного прибора наблюдения была введена возможность периодического полного отключения лазерного излучателя с частотой отключения частотой 1,5–2 Гц и скважностью 2.

Значение частоты мигания 1,5–2 Гц было выбрано как наиболее оптимальное для восприятия оператором. Оно соответствует рекомендациям по выбору частоты мигания для привлечения внимания в диапазоне от 1 до 3 Гц при заполняемости 50%, приведенным в [130]. Эксперименты при других частотах мигания не проводились, так как заранее были признаны не целесообразными.

В режиме мигания лазер все также излучает короткие импульсы с частотой повторения 10–15 кГц, но происходит это в течение промежутка времени, равного величине от 0,5 до 1 секунды. Затем за примерно такое же время осуществляется наблюдение без включения лазера. Затем процесс повторяется. Оператор при этом видит мигание отражающих объектов с частотой 1,5–2 Гц и легко отличает бликующие в результате подсветки прибором предметы от просто ярких

точечных объектов, не мигающих в процессе наблюдения и остающихся статичными.

Увеличение скорости обнаружения точечных отражающих объектов и уменьшение вероятности ошибки были подтверждены экспериментально. Результаты экспериментов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментов по обнаружению точечных объектов

Время обнаружения объекта, с	Расстояние до объекта, м							
	100	200	300	400	500	600	700	800
Среднее с миганием	2	2	2	4	4	4	5	5
Среднее без мигания	5	7	12	20	20	20	30	30
Максимальное с миганием	5	5	6	5	7	7	8	8
Максимальное без мигания	15	20	20	34	45	50	51	55
Ложные результаты, мигание	-	-	-	-	-	-	-	-
Ложные результаты, без мигания	-	-	+	-	-	+	+	+

Под средним временем обнаружения объекта в таблице подразумевается округленное медианное значение, полученное в результате проведения нескольких серий испытаний при различной освещенности и на различных объектах (катафоты, ретроотражающие метки, оптические приборы).

На различных дистанциях от 100 до 800 метров и при различных условиях окружающей освещенности в диапазоне от 100 лк до 5000 лк поиск мигающего объекта, расположенного на заранее не известном оператору расстоянии, занимал не более 7 секунд. Из них большая часть времени уходила на подбор дальности подсветки. Все имевшиеся на местности объекты, роль которых играли катафоты, ретроотражающие метки и закрепленные на штативах бинокли, легко

обнаруживались. А при отсутствии объектов в поле зрения оператор принимал верное решение, указав, что объектов нет.

При аналогичных условиях этим же оператором поиск статичного объекта, даже расположенного на заранее известном расстоянии, занимал в среднем от 20 до 40 секунд. При этом некоторые объекты оказывались не обнаруженными (ложноотрицательный результат), а в отдельных случаях оператор ошибался «обнаружив» объекты там, где их на самом деле было (ложноположительный результат).

4.5 Наблюдение в условиях ограниченной видимости

Активно-импульсные устройства и системы могут применяться не только в качестве поисковых приборов для обнаружения оптики, ведущей встречное наблюдение. Они также могут использоваться в качестве устройств, позволяющих наблюдать в условиях мутных сред, например, при задымлении. Поэтому было принято решение протестировать разработанный макет активно-импульсной системы без ЭОП в таких условиях.

Для проведения эксперимента было подготовлено изолированное помещение, которое было насыщено дымом. Источником дыма в эксперименте служила пейнтбольная дымовая шашка. В качестве наблюдаемого предмета использовалась мира в виде вертикальных штрихов, распечатанная на двух листах формата А4, расположенных вместе. Ширина линии и расстояние между линиями составляет 30 мм. Вертикальный размер штрихов 270 мм.

Мира располагалась на расстоянии 20 метров от макета активно-импульсного прибора наблюдения. Оператор в помещении отсутствовал. Наблюдение изображений и управление макетом прибора осуществлялось дистанционно при помощи персонального компьютера. В эксперименте дистанция наблюдения постепенно менялась от минимальной и до такого значения, когда мира становилась отчетливо различимой.

Примеры наблюдавшихся в ходе проведения эксперимента изображений приведены на рис. 52, наглядно демонстрирующем возможности реализации

метода наблюдения со стробированием по дальности (активно-импульсного видения) при использовании предложенного способа управления ПЗС-матрицей со строчным переносом.

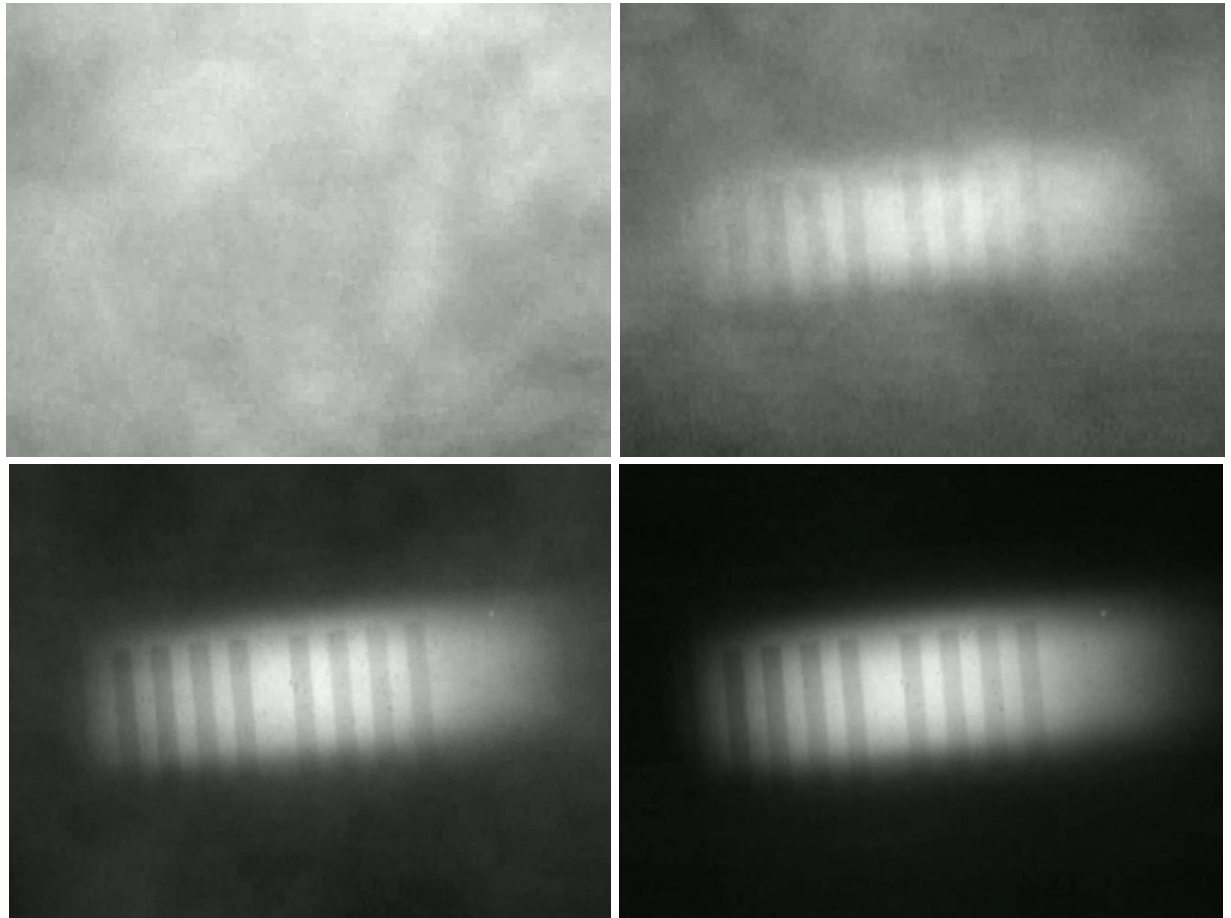


Рисунок 52 – Наблюдение в условиях задымления. Пояснения в тексте

На данном рисунке приведены кадры изображения, снятые в моменты наблюдения:

- в пассивном режиме при естественной освещенности, без использования лазерной подсветки (первый скриншот);
- снятые в активно-импульсном режиме наблюдения при установленной дальности подсветки 10, 15 и 20 метров (остальные кадры в порядке сверху вниз и слева направо).

Эксперимент демонстрирует, что при постепенном увеличении дистанции наблюдения (то есть дистанции, начиная с которой, отраженный свет подсветки не отсекается) на дисплее пропадет помеха в виде изображения дыма.

При установленной дальности наблюдения, соответствующей дальности размещения миры, дым не виден, что говорит о том, что свет, отраженный от частиц дыма, полностью отфильтрован.

А при наблюдении на меньшие дистанции (или, что то же самое – при установленном времени задержки стирания и считывания зарядов меньшем, чем необходимо свету пройти расстояние до объекта и обратно) изображение дыма полностью или частично перекрывает изображение цели.

Для каждого из наблюдаемых кадров, кроме снятого в пассивном режиме, наблюдаемая сцена подсвечивалась 25 импульсами. Наблюдения проводились при естественном освещении (через окна), при искусственном (лампы дневного света) и в темноте. Об уровне освещенности в моменты проведения экспериментов говорить неправомерно, так как из-за флуктуаций частиц дыма на одних и тех же участках она постоянно менялась и измерить ее истинное значение было затруднительно.

При наличии бокового источника света (окно) или вертикального (лампы) по сравнению с темным помещением при наблюдении в пассивном режиме изменялась яркость наблюдаемого дыма. Мира во всех случаях оказывалась не видна оператору.

При наблюдении в активно-импульсном режиме во всех условиях наблюдаемые изображения были аналогичны представленным на рис. 52, так как при выводе результирующего изображения на дисплей компьютера осуществлялась автоматическая регулировка контраста и яркости. Другими словами, наличие или отсутствие боковой засветки, а также уровень освещенности в помещении не влиял на результат.

И при полной темноте, и при наличии освещения существенное изменение числа импульсов подсветки в меньшую сторону приводило к уменьшению контрастности миры, а их существенное увеличение приводило к пересвету наблюдаемой миры.

Оптимальное число 25 импульсов лазерного излучателя было определено эмпирическим путем. Возможно, при иной плотности дыма, данное число приняло бы другое значение.

Эксперименты по наблюдению в дыму на расстоянии более 20 метров не проводились по причине отсутствия помещения, позволившего бы их провести, а на открытом пространстве не удалось обеспечить достаточную плотность дыма, чтобы объекты были невидимы в пассивном режиме.

Вместе с тем, исследования поведения активно-импульсной системы в дыму и численная оценка получаемых при этом кадров изображения выходят за рамки данного диссертационного исследования. А цель проведенных экспериментов заключалась лишь в необходимости практического подтверждения работоспособности активно-импульсной системы без ЭОП, а не в проведении измерений величин в зависимости от плотности дыма, расстояния, освещенности или иных параметров.

Отдельно стоит отметить, что на приведенных на рис. 52 скриншотах видно, что площадь пятна лазерной подсветки на расстоянии 20 метров достаточно мала и не покрывает поле зрения полностью. Это связано с тем, что в данном эксперименте использовался объектив излучателя с малой расходимостью, изначально предназначенный для наблюдения на бóльшие, чем 20 метров расстояния.

4.6 Технические характеристики макета активно-импульсного прибора

Так как макет активно-импульсного прибора наблюдения создан на основе ранее разработанного стенда для исследования ПЗС-матриц, его технические характеристики во многом совпадают с характеристиками указанного стенда, перечисленными в разделе 3.1 диссертации. Среди них рабочий температурный диапазон, диапазон напряжений питания, характеристики лазерного излучателя, а также характеристики, относящиеся к передаче изображения на внешние устройства.

Массогабаритные характеристики макета и стенда совпадают частично, так как они являются зависимыми от применяемых окуляра, объективов и фотоприемника. Для построения макета активно-импульсной системы была выбрана монохромная ПЗС-матрица ICX445ALA с шагом 3,75 мкм и максимальным эффективным разрешением 1280×960 элементов. При этом, прибор обладает дисплеем с разрешением всего 800×600, поэтому фотоприемник управляется в режиме «центрального окна».

Основные технические характеристики спроектированного макета активно-импульсного прибора наблюдения приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики разработанного прибора-стенда

Основное напряжение питания	+5...+12 В
Средняя потребляемая мощность, не более	2,5 Вт
Рабочий температурный диапазон	-40...+50 °С
Габаритные размеры (с объективами)	135×120×60 мм
Крепление на штатив	Есть
Масса без аккумулятора	0,9 кг
Масса с аккумулятором	1,3 кг
Длина волны излучателя	905 нм
Импульсная мощность излучателя (при наибольшей длительности импульса), не менее	200 Вт
Длительность импульса	50...150 нс
Частота повторения импульсов	15 кГц
Число лазерных излучателей	1
Разрешение фотоприемника	1280×960
Разрешение наблюдаемого изображения на ПК	1000×600
Разрешение микродисплея	800×600
Кадровая частота, не менее	25 кадров / сек

Продолжение таблицы 3

Тип изображения сцены	монохромное
Тип изображения сцены и служебного кадра	цветное
Соединение с компьютером	HighSpeed USB 2.0
Скорость передачи несжатого видеопотока	до 35 Мб/сек
Управление по USB	Есть
Видимое увеличение (при наблюдении на дисплее), крат	4
Поле зрения (при наблюдении на дисплее)	13,1×9,8 °
Диапазон освещенностей (с учетом возможности использования фильтра), не хуже	0,05...10000 лк
Режимы работы	АИ, пассивный, комбинированный, псевдонепрерывный
Регулировка дальности до переднего края просматриваемой зоны	0...1000 м
Глубина просматриваемой зоны	150...600 м
Дискретность перемещения просматриваемой зоны	5 м, 10 м, 50 м, 100 м

Характеристики, касающиеся изменения глубины просматриваемого пространства путем подсветки сцены лазерным излучением, заглублены искусственно для удобства использования прибора оператором.

В частности, на стенде дискретность перемещения просматриваемой зоны изменялась с шагом 10 нс, что совпадает с периодом тактирования используемой в основе прибора ПЛИС. Это время соответствует расстоянию подсветки чуть менее 1,5 м при условии распространения света в вакууме «туда и обратно». Величина не круглая, а потому не удобная для использования оператором. По результатам полигонных испытаний, была получена рекомендация сделать отображаемый на дисплее прибора шаг перемещения просматриваемой зоны 5 м (соответствует 33 нс), а реальное значение дальности округлять до этой точности.

Для ускорения работы с прибором также предусмотрено изменение дальности с шагом 10 м, 50 м и 100 м.

Предусмотренный диапазон регулировок дальности перемещения переднего края составляет от 0 до 1000 м, при этом реально имеется возможность светить и на большее расстояние, но для наблюдения бликов с большего расстояния требуется существенное увеличение числа импульсов излучения, что, в свою очередь, сказывается на кадровой частоте. Кроме того, на таком расстоянии размеры изображения окружающих блик объектов не превышают нескольких пикселей, что затрудняет их распознавание, и, как следствие, не позволяет определить место расположения бликующего объекта по характерным ориентирам. Дальность распознавания объектов (при возникновении такой потребности) может быть повышена использованием другого объектива с бóльшим фокусным расстоянием, но это, в свою очередь, приведет к пропорциональному уменьшению поля зрения прибора.

Глубина просматриваемой зоны изменяемая. Ее минимальное значение 150 м соответствует времени экспозиции при наблюдении единичного импульса лазерного излучателя, равному 1 мкс. При этом длительность самого импульса лазерного излучателя составляет не более 150 нс, а указанное время в 1 мкс необходимо для обеспечения гарантированного перемещения зарядов из одной секции фотоприемника в другую без потери качества изображения. Следует отметить, что данная величина на 100 нс превышает минимально допустимое значение, полученное в разделе 4.3.

Остальные значения глубины предназначены для удобства использования прибора в условиях, когда необходимо ускорить поиск бликующих объектов на местности за счет одновременного увеличения как самой глубины просматриваемой зоны, так и шага перемещения ее ближнего (по отношению к наблюдателю) края.

4.7 Сравнение классических активно-импульсных систем с системами без электронно-оптического преобразователя

Цифровая активно-импульсная система, полностью реализованная на ПЗС-фотоприемнике со строчным переносом и не имеющая в своей конструкции электронно-оптического преобразователя (ЭОП), обладает по сравнению с активно-импульсной системой, реализованной традиционным способом с использованием ЭОП, рядом преимуществ, ранее уже описанных в первой главе диссертации.

Основным преимуществом является то, что цифровая система без ЭОП по сравнению с содержащей ЭОП обладает меньшими массой и габаритами, так как последняя состоит из тех же самых комплектующих, плюс дополнительно имеет ЭОП и проекционную систему, согласующую ЭОП с фотоприемником.

При прочих равных объектив для ЭОПа должен иметь большее фокусное расстояние, чем объектив для системы с электронным затвором. Отношение фокусных расстояний пропорционально отношению пространственных разрешений ЭОПа и фотоприемной матрицы.

В качестве примера – предельное разрешение ЭОПа (ЭПМ44Г-А [131]) составляет примерно 40 мм^{-1} . Шаг ПЗС-матрицы ICX445 составляет $3,75 \text{ мкм}$ ($0,00375 \text{ мм}$), что при соответствии двух пикселей паре штрихов мира соответствует разрешению:

$$R = 1 / (2 \cdot 0,00375) = 133 \text{ мм}^{-1}$$

Эта величина в $133 / 35 \approx 3,8$ раза выше, чем, у ЭОПа. То есть при равном угловом разрешении, фокусное расстояние объектива для фотоприемной матрицы должно быть в $3,8$ раза меньше, а по массе, соответственно, в $3,8^3 \approx 55$ раз легче.

В конструкции активно-импульсного прибора Зарница [12] использован объектив ЭОПа с фокусным расстоянием 85 мм , массой 210 г . Масса объектива фотоприемной матрицы полностью цифровой системы равного разрешения составляет 4 г . Для дальностей обнаружения цели реализуемых объективом ЭОП

$F = 150$ мм, массы объективов двух вариантов составят 774 и 14 г соответственно. Масса проекционной системы в приборе Зарница составляет 30 г.

В варианте прибора без ЭОП проекционная система отсутствует. Масса самого ЭОП ЭПМ44Г-А составляет 55 г [131]. Если, оценочно, предположить массу, необходимую на корпусирование объемов оптики и ЭОПа, в 50% от их собственной массы, то разница в массе двух вариантов составит:

$$M_1 - M_2 = (210 \text{ г} + 30 \text{ г} + 55 \text{ г}) \cdot 1.5 - 4 \text{ г} \cdot 1.5 \approx 440 \text{ г}$$

для объектива ЭОП $F = 85$ мм, и

$$M_1 - M_2 = (774 \text{ г} + 30 \text{ г} + 55 \text{ г}) \cdot 1.5 - 14 \cdot 1.5 \approx 1270 \text{ г}$$

для объектива ЭОП $F = 150$ мм. При том, что масса всего цифрового изделия без ЭОП в варианте, соответствующем варианту с ЭОП с объективом $F = 85$ мм, составляет 1,3 кг.

Другим преимуществом отказа от использования ЭОП является то, что разрешение полностью цифровой системы ограничено исключительно разрешением используемого фотоприемника и не ограничено дополнительными элементами. Информационный поток через матрицу разрешением 1200×960 пикселей и ЭОП 1000×800 , с учетом формата кадра, примерно соответствуют друг другу. Однако при использовании ЭОПа, результирующая функция передачи модуляции (ФПМ) будет определяться как произведение ФПМ объектива, ФПМ ЭОПа, ФПМ проекционной системы, ФПМ фотоприемника и ФПМ дисплея. То есть даже без учета того, что ПЗС-матрица может быть выбрана с много большим по сравнению с 1000×800 разрешением, информационный поток и пространственное разрешение системы с ЭОП по сравнению с системой без ЭОП будет заведомо снижен. Кроме того, исключение ЭОПа из конструкции активно-импульсной системы обеспечивает возможность наблюдения цветного изображения (при условии использования цветной ПЗС-матрицы).

Для ЭОПа минимальная наработка, заявленная производителем (ОАО «Катод»), составляет 10 000 часов. Однако, эта наработка касается ЭОПов, эксплуатирующихся в темное время суток, а при дневной освещенности

происходит выгорание и деградация фотокатода. Комбинированный фильтр из цветных стекол и интерференционных фильтров прибора Зарница пропускает примерно 1% дневного излучения, что при дневной освещенности 50–100 тысяч люкс влечет неизбежное снижение минимальной наработки ЭОПа даже без попадания Солнца в объектив прибора. В то же время, ПЗС-матрица не имеет ограничений по длительности эксплуатации, в том числе в светлое время суток.

За счет исключения ЭОП и проекционной системы из конструкции активно-импульсного устройства, оно обладает меньшей себестоимостью.

Вместе с тем, активно-импульсная система без ЭОП обладает несколькими недостатками, выявленными в ходе проведения экспериментов.

Основной недостаток заключается в существенно большей длительности строба полностью цифровой активно-импульсной системы по сравнению с классической на основе ЭОП. Этот недостаток проявляется, например, в невозможности отсеять свет, отраженный от объектов, которые находятся всего на 10 метров дальше от наблюдателя, чем объект наблюдения. Причиной данного недостатка является невозможность уменьшения времени считывания зарядов из светочувствительной зоны ПЗС-матрицы в зону вертикального переноса менее некоего значения, например, менее 900 нс для ICX445, как показано в разделе 4.3.

Но для ряда задач, в частности, для обеспечения наблюдения в условиях задымления и иных мутных сред, важно отсеять свет, отраженный именно от объектов, которые находятся на расстоянии ближе заданного, а не от тех предметов, которые находятся позади зоны интереса. В этом случае указанный недостаток является несущественным.

При обнаружении бликующих оптических приборов и комплексов, ведущих встречное наблюдение, недостаток можно обойти тем, что расстояние до них может быть измерено не методом «послойного» сканирования местности с заданным шагом и глубиной строба, а путем постепенного увеличения дальности подсветки до тех пор, пока блик не исчезнет.

Для таких задач, где требуется именно «послойное» сканирование узких участков пространства с глубиной 5, 10, 25 метров и т.д., в частности, для

активно-импульсных систем, используемых для построения 3-D моделей местности, данный недостаток потенциально может быть существенным.

Его устранение является направлением дальнейшей работы и выходит за рамки данной диссертации.

Другой недостаток заключается в том, что из-за отсутствия в конструкции прибора усилителя яркости при использовании активно-импульсной системы без ЭОП для аналогичной интенсивности наблюдаемого изображения необходимо подсвечивать сцену бóльшим числом импульсов лазерного излучателя, чем при использовании классической системы на основе ЭОП или на основе комплексированного с ЭОП фотоприемника, а потому обладающего большей чувствительностью.

В то же время, тесты макета активно-импульсной системы без ЭОП и проведенные на нем эксперименты показали, что:

- число импульсов лазерного излучателя может быть увеличено до значения, при котором наблюдаемое изображение выглядит приемлемо;
- на итоговой кадровой частоте (не менее 25 Гц) увеличенное число импульсов не сказывается.

Поэтому указанный недостаток можно считать малозначительным.

В качестве примера в таблице 4 приведены основные характеристики разработанного макета активно-импульсного прибора наблюдения вместе с характеристиками существующих АИ приборов, выпускаемых серийно. Приведенные характеристики получены из открытых источников, в том числе [11, 132].

Таблица 4 – Технические характеристики АИ приборов иных производителей в сравнении с характеристиками разработанного макета

	Дон-800	Призрак	Мираж	1ПН106	Принц-Р	Nord Lynx	Разработ. макет
Поле зрения	8×6°	5×4 °	4,5×3,3°	9° (поле изл. 1°)	8×6°	20×15°	13×9,8°
Дальность подсветки, м	800	1000	1200	900	1000	–	1000
Глубина просм. зоны, м	–	10/20/50/500	10/20/50	–	10/20/50/100/200	30–300	от 150
Масса, кг	1,8	1,8	2,3	3,5	1,8	20,0	1,3
Габаритные размеры	200×172×76	245×145×70	325×140×80	750×538×395	170×140×70	350×300×150	135×120×60
Энергопотребление, Вт	–	10	13	<1	–	150	2,5
Разрешение изображения	800×600 (визирный канал)	350 ТВЛ	350 ТВЛ	300 ТВЛ	800×600 (визирный канал)	450 ТВЛ	1280×960 (ФПУ) 800×600 (дисплей)

Отдельно следует упомянуть еще один недостаток системы без ЭОП. Он заключается в меньшем пороге минимальной освещенности, при которой устройство без ЭОП способно работать в пассивном режиме, по сравнению с устройством на основе ЭОП. Данный недостаток является общим для всех систем видеонаблюдения на основе типовых КМОП- и ПЗС-матриц, обладающих заведомо меньшей чувствительностью по сравнению с ЭОП или гибридными фотоприемниками, комплексированными с усилителями яркости.

Вместе с тем, обязательность возможности работы при любых освещенностях в именно пассивном режиме с полностью выключенной подсветкой является спорной, так как цели и задачи использования активно-импульсных систем все же отличаются от целей и задач использования пассивных приборов ночного видения, даже если при некоторых условиях одни опτικο-электронные приборы могут выполнять функции других.

Выводы по результатам четвертой главы

1. Исследован действующий макет активно-импульсного прибора наблюдения, который использовался в качестве лабораторного стенда для изучения особенностей поведения ПЗС-матрицы со строчным переносом при управлении ею предложенным недокументированным способом.

2. Проведены эксперименты, подтвердившие работоспособность и практическую применимость предложенного способа управления ПЗС-матрицей.

3. Наглядно продемонстрирована возможность построения активно-импульсной системы без ЭОП, предназначенной для обнаружения отражающих объектов на местности или для наблюдения в условиях ограниченной видимости (дым, мутные среды).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами работы являются:

1. Разработан и исследован способ управления ПЗС-матрицей со строчным переносом, позволяющий реализовать на ее основе систему наблюдения методом стробирования (активно-импульсную систему).

2. Разработаны алгоритмы формирования управляющих сигналов ПЗС-матриц со строчным переносом, реализующие предложенный способ управления ПЗС-матрицами.

3. Спроектирован прибор-стенд, позволивший управлять ПЗС-матрицами недокументированными способами и провести экспериментальную апробацию предложенного способа управления ПЗС-матрицей. Прибор-стенд используется в качестве макета активно-импульсной системы без ЭОП.

4. Проведенные в ходе работы эксперименты показали работоспособность предложенного способа управления ПЗС-матрицей и наглядно продемонстрировали его практическую применимость. На его основе могут быть разработаны перспективные малогабаритные цифровые активно-импульсные системы наблюдения, обладающие меньшими массой и габаритными размерами по сравнению с аналогичными приборами, реализованными на основе электронно-оптических преобразователей.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АИ – активно-импульсный

АЦП – аналого-цифровой преобразователь

ДКВ – двойная коррелированная выборка

ИК – инфракрасный

КМОП – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник

КМОП-матрица – матричное фотоприемное устройство, выполненное на основе технологии КМОП

КМОП-фотоприемник – КМОП-матрица

ЛИ – лазерный излучатель

ОС – операционная система

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ПЗС-матрица – матричный фотоприемник, выполненный по технологии ПЗС

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

ПЗС-фотоприемник – ПЗС-матрица

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

СП – сигнальный процессор

ФПМ – функция передачи модуляции

ЭОП – электронно-оптический преобразователь

BGA – ball grid array (тип корпуса поверхностно-монтируемой микросхемы)

ERCS – встраиваемая реконфигурируемая вычислительная система

FRAM – ферроэлектрическое запоминающее устройство с произвольным доступом

LVDS – низковольтная дифференциальная передача сигналов

SDRAM – синхронное динамическое оперативное запоминающее устройство

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molebny, V. Laser radar: historical prospective – from the East to the West / V. Molebny, P.F. McManamon, O. Steinvall, T. Kobayashi, W. Chen // Proc. SPIE 031220. – Optical Engineering. – 2016. – V. 56. – No. 3. – DOI: 10.1117/1.OE.56.3.031220.
2. Голицын, А.А., Активно-импульсный метод наблюдения с использованием ПЗС-фотоприемника со строчным переносом / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Изв. вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 11. – С. 1040–1047. – DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-11-1040-1047.
3. Горобец, В.А., Активно-импульсные системы видения и алгоритмы определения расстояний до объектов / В.А. Горобец [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81. – № 2. – С. 283–291.
4. Мищенко, Н.И. Методы и средства повышения технических характеристик активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем наблюдения / Н.И. Мищенко, И.Н. Пустынский // Доклады омского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2014. – Т. 35. – № 3. – С. 47–52.
5. Кирпиченко, Ю.Р. Видеоинформационные системы наблюдения и контроля при сложных условиях видимости / Ю.Р. Кирпиченко, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26). – Ч. 1. – С. 105–110.
6. Голицын, А.А., Активно-импульсные приборы обнаружения потенциальных угроз / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Материалы Двадцать третьей Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых ВНКСФ-23, 1–8 апреля 2017, г. Екатеринбург. – Екатеринбург: Уральское издательство, 2017. – С. 263.
7. Белов, В.В. Активные ТВ-системы видения с селекцией фонов рассеяния / В.В. Белов [и др.] // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С. 25–30.
8. Letalick, D. 3-D Imaging by Laser Radar and Applications in Preventing and Combating Crime and Terrorism / D. Letalick [и др.] // Proceedings of the RTO

- SCI Symposium on Systems Concepts and Integration (SCI) Methods and Technologies for Defence Against Terrorism, 25-27 Oct, 2004. – Vol. RTO-MP-SCI-158. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Meeting%20Proceedings/RTO-MP-SCI-158/MP-SCI-158-16.pdf>
9. Мищенко, Н.И. Методы и средства повышения эффективности активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем мониторинга и обеспечения безопасности объектов / Н.И. Мищенко, И.Н. Пустынский, В.В. Капустин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2016. – № 3, том 19. – С. 42 – 46. – DOI: 10.21293/1818-0442-2016-19-3-42-46.
 10. Волков, В.Г. Активно-импульсные ПНВ и тепловизионные приборы: анализ возможностей применения / В.Г. Волков // Фотоника. – 2007. – № 4. – С.24–28.
 11. Белоконев, В.М. Лазерный телевизионный прибор / В.М. Белоконев, В.Г. Волков, В.Л. Саликов, Б.А. Случак // Прикладная физика. – 2013. – № 4. – С. 16–22.
 12. Голицын, А.В. Псевдобинокулярный многоканальный прибор обнаружения потенциальных угроз / А.В. Голицын [и др.] // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 27–34.
 13. Дегтярев, П.А. Активно-импульсная телевизионная система с дистанционным управлением / П.А. Дегтярев // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 5. – С. 1–4.
 14. Тарасов, В.В. Современные проблемы оплотехники: учебное пособие / В.В. Тарасов, И.П. Торшина, Ю.Г. Якушенков. – М.: МИИГАиК, 2014. – 82 с.
 15. Попов, Г.Н. Возможность обнаружения и подавления оптико-электронных средств / Г.Н. Попов, П.Г. Голубев, Н.Н. Мордвин, С.Д. Питик // Прикладная физика. – 2007. – № 2. – С. 124–127.
 16. Волков, В.Г. Применение активно-импульсных приборов наблюдения для видения бликующих элементов / В.Г. Волков // Вопросы оборонной техники. Серия 11. – 1995. – Т. 144-145. – № 1-2. – С. 3–7.

17. 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.
18. Дирочка, А.И. Направления развития современной фотоэлектроники (обзор по материалам XXIII международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения) / А.И. Дирочка, М.Д. Корнеева, А.М. Филачев // Успехи прикладной физики. – 2014. – Т. 2. – № 4. – С. 353–366.
19. Академик Александр Алексеевич Лебедев (к 70-летию со дня рождения) // Оптико-механическая промышленность. – 1963. – № 10. – С. 5–6.
20. Балаков, В.В., Очерк научной деятельности академика А. А. Лебедева / В.В. Балаков, В. Г. Вафиади, отв. ред. П.П. Феофилов // Академик А. А. Лебедев. Избранные труды – Л.: Наука, 1974. – С. 3–16.
21. Neumann, D.V. Precision range gated imaging technique / D.V. Neumann // Journal of the SMPTE. – 1965. – Vol. 74. – Pt. 1. – Apr. – Pp. 313–319. – DOI: 10.5594/J06040.
22. Пат. 3380358 США. Range gated imaging system / D.V. Neumann. – Заявл. 24.08.1965; опубл. 30.04.1968.
23. Donati S., Evaluation of visibility improvement in fog by the range gating technique / S. Donati, A. Sona // Opto-electronics. – 1969. – 1(2). – Pp. 89–101. – DOI: 10.1007/BF01418101.
24. Gillespie, L.F. Apparent illuminance as a function of range in gated, laser night-viewing systems / L.F. Gillespie // Journal of the optical society of America. – 1966. – Vol. 56 – No. 7. – Pp. 883–887. – DOI: 10.1364/JOSA.56.000883.
25. Пат. 3689156 США. Range gated image systems using pulsed illuminators / М. Керрхар. – Заявка № 04/875862; заявл. 12.11.1969; опубл. 5.09.1972.
26. Арпишкин, В.М. Применение ОКГ с упорядоченными импульсами в приборе наблюдения с пространственной селекцией / В.М. Арпишкин, М.П. Ванюков, О.Б. Данилов // Оптико-механическая промышленность. – 1967. – № 9. – С. 1–3.

27. Дутов, Г.Г. Расчет контраста объектов при использовании метода пространственной селекции / Г.Г. Дутов, В.Р. Муратов // Оптико-механическая промышленность. – 1969. – Т. 33. – С. 6–8.
28. Ермаков Б.А. Оптико-электронные приборы с лазерами / Б.А. Ермаков. – Л.: ГОИ, 1982. – 200 с.
29. Richardson, M.A. Surveillance and target acquisition systems, Second Edition / M.A. Richardson [и др]. – London: Brassey's (UK) Ltd., 1997. – 260 p.
30. Гейхман, И.Л. Основы улучшения видимости в сложных условиях / И.Л. Гейхман, В.Г. Волков. – М.: Недра, 1999. – 286 с.
31. Грузевич, Ю.К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю.К. Грузевич. – М.: Физматлит, 2014. – 276 с.
32. Курячий М.И., Пространственно-временная ранговая обработка изображений в видеоинформационных системах: моногр. / М.И. Курячий, А.Г. Костевич, И.В. Гальчук – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2013. – 120 с.
33. Карасик, В.Е. Лазерные системы видения / В.Е. Карасик, В.М. Орлов. – М.: МГТУ, 2001. – 350 с.
34. Busck, J. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar / J. Busck, H. Heiselberg // Applied Optics. – 2004. – Vol. 43. – No. 24. – Pp. 4705–4710. – DOI: 10.1364/AO.43.004705.
35. Комплекс лазерной локации [Текст]: патент РФ RU 2529758 C1 / С. К. Манкевич, А. В. Лукин, А. В. Семенко; заявитель и патентообладатель ОАО «Национальный центр лазерных систем и комплексов «Астрофизика» – заявка № 2013125785; заявл. 05.06.2013; опубл. 27.09.2014; Бюл. № 27.
36. Artamonov, S.I. Analytical Review of the Development of Laser Location Systems / S.I. Artamonov [и др.] // Indian Journal of Science and Technology. – 2017. - Vol. 10. – No. 15. – Pp. 1–15. – DOI: 10.17485/ijst/2017/v10i15/106332.
37. Grasso, R. J. Imaging laser radar performance assessment against various naturally occurring and manmade terrestrial objects / R.J. Grasso [и др.] // Proc. IEEE Conf.

- 2000 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (Cat. No. 00TH8505), 10-15 Sept. 2000. – DOI: 10.1109/CLEOE.2000.909695.
38. Steinvall, O. Gated viewing for target detection and target recognition / O. Steinvall, H. Olsson, G. Bolander, C. Carlsson, D. Letalick // Proc. SPIE 3707, Laser Radar Technology and Applications IV (28 May 1999). – DOI: 10.1117/12.351364.
39. Kuntsevich, B.F. A simple method for determining distances by range-gated vision systems with different forms of illuminating pulses / B. F. Kuntsevich, D. V. Shabrov // Proc. SPIE 11159, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XVI (9 October 2019). – DOI: 10.1117/12.2532103.
40. Chaldina, E.S. Study of the Time-of-Flight Method for Measuring Distances to Objects Using an Active-Pulse Television Measuring System / E. S. Chaldina, A. K. Movchan, V. V. Kapustin // Proc. IEEE 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). Novosibirsk, Russia. – 2019. – Pp. 0457–0461. – DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958457.
41. Kabashnikov, V. Optimal conditions for distance determination by the range-intensity correlation methods using range-gated viewing system with nonrectangular pulses / V. Kabashnikov, B. Kuntsevich, // Proc. SPIE 11160, Electro-Optical Remote Sensing XIII, 2019. – DOI: 10.1117/12.2532293.
42. Chua, S.Y., Improving three-dimensional (3D) range gated reconstruction through time-of-flight (TOF) imaging analysis / S.Y, Chua [и др.] // J. Eur. Opt. Soc.-Rapid. – 2016. – V. 11. – DOI: 10.2971/jeos.2016.16015.
43. Laurenzis, M. 3D range-gated imaging in scattering environments / M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin, I. Zielenski // Proc. SPIE 7684, Laser Radar Technology and Applications XV, 768406 (29 April 2010). – DOI: 10.1117/12.849630.
44. Baranov, P.S. Multi-Pulse Active CCD Television System Model For 3D Imaging / P. S. Baranov et al // Extreme Robotics. – 2019. – Vol. 1. – No. 1. – Pp. 45–51.
45. Денисов, А.В. Оптико-электронный комплекс детального наблюдения / А.В. Денисов, В.В. Попов, С.В. Логунов, П.В. Краев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2020. – Т. 1. – № 1. – С. 24–31. – DOI: 10.17586/2226-1494-2020-20-1-24-31.

46. Chua, S.Y. Three-dimensional (3D) Reconstruction of Range Gated Imaging / S.Y. Chua, K.W. Chew, N. Guo, X. Wang, // Proc. IEEE Conf. 2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP), 9-11 April 2018. – DOI: 10.1109/ICP.2018.8533195.
47. Mariani, P. Range-Gated Imaging System for Underwater Monitoring in Ocean Environment / P. Mariani [и др.] // Sustainability. – 2019. – Vol. 11. – No. 1. – P.162. – DOI: 10.3390/su11010162.
48. Seung-Kyu, P. Range resolution improvement of range-gated vision system in backscattering hazy environments / P. Seung-Kyu, Ch. In-Young, B. Sung-Hoon, J. Kyung-Min // Optica Applicata. – 2017. – Vol. XLVII. – No. 4. – Pp. 533–543. – DOI: 10.5277/oa170404
49. Risholm, P. A scatter removal technique to enhance underwater range-gated 3D and intensity images / P. Risholm [и др.] / Proc. IEEE Conf. Oceans 2018 MTS/IEEE Charleston, 22-25 Oct. 2018. – Pp. 1–6. – DOI: 10.1109/OCEANS.2018.8604613.
50. Белов, В.В. Экспериментальные исследования влияния оптических характеристик среды на качество изображения в ОЭС видения с селекцией помехи обратного рассеяния / В.В. Белов [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 30. – № 4. – С. 285–290. – DOI: 10.15372/AOO20170404.
51. Капустин, В.В. Активно импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях / В.В. Капустин, А.К. Мовчан, Е.В. Зайцева, М.И. Курячий // Транспортные системы и технологии. – 2018. Т. 4. – № 1. – С. 68–83. – DOI: 10.17816/transsyst2018041068-083.
52. Суриков, А.В. Оптико-электронная система для улучшения видимости при задымлении / А. В. Суриков, Н. С. Лешенюк, Б. Ф. Кунцевич, В. В. Горобец // Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2014. – Т. 20. – № 2. – С. 4–12.
53. Gorobets, V.A. Visibility Zone of Active-Pulse Vision Systems When Observing Along Inclined Paths / V. A. Gorobets [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. – 2016. – V. 83. – No. 1. – Pp. 93–99. – DOI: 10.1007/s10812-016-0248-7.

54. Piszczec, M. Imaging with a laser photography camera during limited visibility / M. Piszczec [и др.] // *Photonics Letter of Poland*. – 2014. – V. 6. – No. 1. – Pp. 41–43. – DOI: 10.4302/plp.2014.1.15.
55. Braesicke, K. Workbench for the computer simulation of underwater gated viewing systems / K. Braesicke, D. Wegner, E. Repasi // *Proc. SPIE 10186B, Ocean Sensing and Monitoring IX*, 2017. – DOI: 10.1117/12.2262415.
56. Busck, J. Optical identification of sea-mines Gated viewing three-dimensional laser radar. : диссертация Ph.D. – Technical University of Denmark, Denmark, 2005.
57. Christnacher, F. Influence of gating and of gate shape on the penetration capacity of range-gated active imagine in scattering environments / F. Christnacher [и др.] // *Optics express*. – 2015. – V. 23. – Pp. 32897–32908. – DOI: 10.1364/OE.23.032897.
58. Кирпиченко, Ю. Р. Минимизация искажений в процессе преобразования изображения с экрана ЭОП в видеосигнал / Ю.Р. Кирпиченко // *Электронные средства и системы управления*. – 2012. – № 2. – С. 150–154.
59. PiV model 16-40MiV Fast Gating Intensified Camera : [буклет] / Invisible Vision Ltd. – Великобритания, 2015.
60. Christnacher, F. Sixty years of advanced imaging at the French-German Research Institute of Saint-Louis: from the Cranz-Schardin camera to computational optics / F. Christnacher, M. Laurenzis, Y. Lutz, A. Matwyschuk // *Advanced Optical Technologies*. – 2019. – Vol. 8. – Issue 6. – DOI: 10.1515/aot-2019-0036.
61. Алымов, О.В. Фотоприемные датчики и устройства телевизионных и оптико-электронных систем видеоинформации / О.В. Алымов, Г.В. Левко // *Оптический журнал*. – 2012. – Т. 79. – № 11. – С. 93–97.
62. Медведев, А. Высокоэффективный гибридный преобразователь изображения / А. Медведев // *Фотоника*. – 2012. – № 6. – С. 44–49.
63. Айнбунд, М.Р. Гибридные фотоэлектронные приборы (обзор) / М.Р. Айнбунд, Д.Е. Миронов, В.И. Зубков // *Успехи прикладной физики*. – 2018. – Т. 6. – № 5. – С. 401–408.

64. Балясный, Л. М. Высокочувствительный гибридный фотоприемный модуль на основе фотокатодов с отрицательным электронным средством и матриц ПЗС (КМОП) с электронной бомбардировкой тыльной стороны / Л. М. Балясный [и др.] // Прикладная физика. – 2018. – № 4. – С. 74–78.
65. Laurenzis, M. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping / M. Laurenzis, F. Christnacher, D. Monnin // Optics Letters. – 2007. – Vol. 32. – No. 21. – Pp. 3146–3148. – DOI: 10.1364/OL.32.003146.
66. Умбиталиев, А.А. Управление режимом накопления в твердотельных фотоприемниках / А.А. Умбиталиев [и др.] // Оптический журнал. – 2012. – Т. 79. – № 11. – С. 84–92.
67. Голицын, А.А. Лабораторный стенд для исследования возможностей ПЗС-фотоприемника по использованию в составе активно-импульсных приборов / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Сборник трудов XII Международной конференции «Прикладная оптика – 2016», 2016. – Т.2 – С. 201–202.
68. Алантьев, Д.В. Стенд для исследования возможности использования матричных фотоприёмников видимого диапазона в составе активно-импульсных приборов наблюдения / Д.В. Алантьев, А.А. Голицын, А.В. Голицын, Н.А. Сейфи // Оптический журнал. – 2018. – Т. 85. – № 6. – С. 53–57. – DOI: 10.17586/1023-5086-2018-85-06-53-57.
69. Голицын, А.А. Аппаратно-программный комплекс для исследования возможностей применения ПЗС-фотоприемников в составе активно-импульсных систем наблюдения / А.А. Голицын // Автометрия. – Т. 55. – № 5. – С. 107–114. – DOI: 10.15372/AUT20190515.
70. Ren, X. High-resolution depth profiling using a range-gated CMOS SPAD quanta image sensor / Ximing Ren [et al.] // Optics Express. – 2018 – V. 26. – Issue 5. – Pp. 5541–5557. – DOI: 10.1364/OE.26.005541.
71. Bronzi, D. 100 000 Frames/s 64×32 Single-Photon Detector Array for 2-D Imaging and 3-D Ranging / Danilo Bronzi [et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2014. – V. 20. – No. 6. – Pp. 354–363. – DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2341562.

72. Горбачев, А.А. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе / А. А. Горбачёв, В. В. Коротаев, С. Н. Ярышев – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 98 с.
73. Бокшанский, В.Б. Расчет характеристик фоточувствительных приборов с зарядовой связью: Учебно-методическое пособие / В.Б. Бокшанский, В.Е. Карасик – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 52 с.
74. Голицын, А.А. Реализация активно-импульсного режима на ПЗС-матрице / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Прикладная физика. – 2018. – № 1. – С. 78–83.
75. Theuwissen, A.J.P. Solid-state imaging with charge-coupled devices / A.J.P. Theuwissen. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. – 388 p.
76. Sony ICX618ALA [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.npk-photonica.ru/images/icx618ala.pdf>
77. Sony ICX659ALA [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.npk-photonica.ru/images/icx659ala.pdf>
78. Sony ICX445ALA-E [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.altavision.com.br/Arquivos/Sensor/ICX445_datasheet.pdf
79. KAI-47051 8856(H) x 5280(V) Interline CCD Image Sensor [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/KAI-47051-D.PDF>
80. Способ активно-импульсного видения [Текст]: патент РФ RU 2657292 C1 / Голицын А.А., Сейфи Н.А.; заявитель и патентообладатель ИФП СО РАН – заявка № 2017100286; заявл. 09.01.2017; опубл. 13.06.2018; Бюл. № 17.
81. Seyfi, N.A. Optimization of CCD-based gated-viewing system for low illumination conditions / N.A. Seyfi, A.A. Golitsyn, A.V. Golitsyn // Proc. 20th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2019. – pp. 313–316. – DOI: 10.1109/EDM.2019.8823356.
82. Голицын, А.А. Оптимизация активно-импульсного метода наблюдения с использованием ПЗС-приемника при низкой освещенности / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2018.

- Т. 61. – № 12. – С. 1072–1076. – DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1072-1076.
83. SVGA+ Rev3 XL Series Active Matrix OLED Microdisplay. User's Specification. Rev. 4 – USA: eMagin Corporation, 2010. – 46 p.
84. SVGA060 Series Low-Power AMOLED Microdisplay [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.olightek.com/downloadRepository/0061321b-a4e8-4ee1-ab03-d54c8403509d.pdf>
85. Войтов, В.А., Способ формирования единого информационного поля / В.А. Войтов [и др.] // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 12. – С. 84–87.
86. Джакония, В.Е. Телевидение / В.Е. Джакония. – М.: Горячая линия - Телеком, 2002. – 640 с.
87. Датчики видимого и ИК-диапазонов: каталог продукции / НПК «Фотоника». – СПб., 2015. – 28 с.
88. Seyfi, N.A. Instrumentation for testing the possibility of using CCD image sensors in gated-viewing devices / N.A. Seyfi, A.A. Golitsyn // In. proc. 2018 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – 2018. – pp. 281–284. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545234.
89. Sony ICX445AQA [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://ic-contract.ru/images/pdf/SONY/CCD-matrix/ICX445AQA.pdf>
90. CCD and CMOS Image Sensors: A Comprehensive Guide for Professional Videographers. / Sony Electronics Inc. – [США], 2008. – 28 p.
91. Голицын, А.А. О необходимости применения в цифровых прицелах фотоприемников с избыточным разрешением / А.А. Голицын // Спецтехника и связь. – 2015. – № 1. – С. 17–19.
92. Пат. 3971065 США. Color imaging array / В.Е. Байер. – Заявка № 05/555477; заявл. 05.03.1979; опубл. 20.07.1976.
93. High Power Laser Diodes for Range Finding / Perkin Elmer [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-6562DTS_HighPowerLaserDiodesforRangeFinding.pdf

94. Pulsed Laser Diodes. Avalanche Photodiodes: [Каталог продукции] / Laser Components [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.lasercomponents.com/fileadmin/user_upload/home/Datasheets/lc/kataloge/pld-apd.pdf
95. Пустынский, И.Н. Методы и средства повышения помехоустойчивости и качества изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем / И.Н. Пустынский, Б.И. Авдоченко, Е.В. Зайцева, М.И. Курячий, Ю.Р. Кирпиченко, В.В. Капустин // Доклады ТУСУРа. – 2017. – Т. 20. – № 3. – С. 86–89.
96. Голицын, А.А. Визирный канал активно-импульсного прибора обнаружения потенциальных угроз противника / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Наука. Промышленность. Оборона. Труды XVII Всероссийской научно-технической конференции: в 4 т. – Новосибирск: НГТУ, 2016. – С. 195–198.
97. Голицын, А.А. Электронный модуль цифровой обработки изображения для устройства круглосуточного наблюдения / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2012. – Т. 7. – Вып. 3. – С. 129–136.
98. Быков, Р.Е. Цифровое преобразование изображений: учеб. пособие для вузов / Р.Е. Быков [и др.]. – М.: Горячая линия - Телеком, 2003. – 228 с.
99. Шаронов, В.В. Наблюдение и видимость / В.В. Шаронов – М.: Воениздат, 1963. – 77 с.
100. Цицулин, А.К. Автоматическое управление чувствительностью в телевизионных системах / А.К. Цицулин [и др.] // Оптический журнал. – 2019. – Т. 86. № 9. – С. 30–37. – DOI: 10.17586/1023-5086-2019-86-09-30-37.
101. 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.
102. Burger, W. Principles of Digital Image Processing. Core Algorithms. 1st Edition / W. Burger, M.J. Burge. – Springer, 2009. – 329 p.

103. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. под ред. П.А. Чочиа – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
104. Муратов, Е.Р. Алгоритмы предварительной обработки изображений в системах комбинированного видения летательных аппаратов : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.01 / Е.Р. Муратов – Рязань: Редакционно-издательский центр РГРТУ, 2013. – 16 с.
105. Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И.С. Грузман [и др.] – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
106. Hauck, S. Reconfigurable computing: the theory and practice of FPGA-based computation / S. Hauck, A. Dehon. – USA, Burlington: Elsevier Inc., 2008. – 945 p.
107. Журов, Г.Е. Универсальная модульная реконфигурируемая система для обработки сигналов тепловизионных и многоканальных приборов в реальном времени / Г.Е. Журов, М. Ю. Цивинский // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 5. – С. 44–46.
108. Cyclone IV FPGA Family Overview. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.altera.com/products/fpga/cyclone-series/cyclone-iv/features/cyiv-overview.html>
109. Data Sheet Final ADSP-BF531/ADSP-BF532 Blackfin Embedded Processor, Rev H. / Analog Devices, Inc. – USA, 2013. – 64 p.
110. Micron SDRAM Part Catalog [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.micron.com/products/dram/sdram/sdram-part-catalog/>
111. Долгушин, С. Высокоскоростные контроллеры USB производства компании Cypress / С. Долгушин // Компоненты и технологии. – 2006. – № 6. – С. 116–119
112. VSP1900 8-Channel Vertical Driver for CCD Sensors with Electric Shutter / Texas Instruments [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/gpn/vsp1900>

113. AD9970 14-Bit CCD Signal Processor with Precision Timing Generator / Analog Devices [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.analog.com/en/products/ad9970.html>
114. ADA4800. Low Power, High Speed CCD Buffer Amplifier / Analog Devices [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADA4800.pdf
115. Кечиев, Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев. – М.: ИДТ, 2007. – 616 с.
116. Фортунато, М. Эффективная система заземления на платах с ИС смешанного сигнала / М. Фортунато // Новости электроники. – 2015. – № 9. – С. 21–25.
117. Мартин, Т. Микроконтроллеры фирмы STMicroelectronics на базе ядра Cortex-M3. Серия STM32. (перевод с английского) / Т. Мартин. – М.: Техносфера, 2009. – 162 с.
118. 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.
119. Thomas D. Logic Design and Verification Using SystemVerilog (Revised) / D. Thomas. – Pittsburgh, PA, 2016. – 336 p.
120. Поляков, А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры на ПЛИС: Учебное пособие / А.К. Поляков – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 220 с.
121. Акчурин, А.Д. Программирование на языке Verilog: Учебное пособие / А.Д. Акчурин, К.М. Юсупов – Казань: Изд-во КФУ, 2016. – 90 с.
122. Сивухин, Д.В. Поглощение света и уширение спектральных линий // Общий курс физики. – М.: Физматлит, 2005. – Т. IV. Оптика. – С. 582–583.
123. Демин, А.В. Представление экспериментальных данных об оптических параметра атмосферы аналитическими зависимостями / А.В. Демин, М.И. Моисеева // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского гос. ун-та информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – № 2 (72). – С. 90–94.

124. Барышников, Н.В. Автоматизация измерений световозвращательных характеристик / Н.В. Барышников, В.Б. Бокшанский, И.В. Животовский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Приборостроение". – 2004. – № 2. – С. 27–35.
125. Голицын, А.В. Обнаружение точечных объектов переменной интенсивности / А.В. Голицын, А.А. Голицын // Точприбор: Монография в 3 т. Том 1: Оптические и оптико-электронные приборы, системы прицеливания, разведки и наблюдения для сухопутных войск / Отв. ред.-сост. В.В. Малинин. – Новосибирск: Наука, 2011. – С. 194–197.
126. Волков, В.Г. Основы построения активно-импульсных приборов ночного видения с использованием лазерных излучателей : дис. докт. техн. наук: 05.27.03. / В.Г. Волков. – М. 2005. – 367 с.
127. ГОСТ ИЕС 60461-2014. Код временной и управляющий. – М.: Стандартиформ, 2015. – 34 с.
128. Дворкович, В.П. Цифровые видеоинформационные системы (теория и практика) / В.П. Дворкович, А.В. Дворкович. – М.: Техносфера, 2012. – 1008 с.
129. Голицын, А.В. Повышение эффективности лазерного локатора оптических систем / А.В. Голицын // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2009. – Т. 52. – № 6. – С. 18–21.
130. ГОСТ Р ИСО 9241-303-2013. Эргономика взаимодействия Человек-Система. Часть 303. Требования к электронным видеодисплеям. – М.: Стандартиформ, 2014. – 35 с.
131. Электронно-оптический преобразователь ЭПМ 44Г-А [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ooprivor.ru/?i=3881>
132. Случак, В. Обзор приборов для активно-импульсного метода наблюдения / В. Случак, В. Старцев // Технологии защиты. – 2019. – № 2. – С. 20–22.

ПРИЛОЖЕНИЕ А ПАТЕНТ НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2657292

СПОСОБ АКТИВНО-ИМПУЛЬСНОГО ВИДЕНИЯ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФП СО РАН) (RU)*

Авторы: *Голицын Александр Андреевич (RU), Сейфи Наталья Андреевна (RU)*

Заявка № 2017100286

Приоритет изобретения 09 января 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 13 июня 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 09 января 2037 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
ФГУП «ГосНИИПП» по науке
доктор технических наук

О.В. Цветков



«28» _____ 2021 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Сейфи Н.А. на тему «Метод реализации активно-импульсного видения
на основе ПЗС-фотоприёмника»

Результаты диссертационной работы Сейфи Натальи Андреевны на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Метод реализации активно-импульсного видения на основе ПЗС-фотоприёмника» реализованы в научно-исследовательской работе по договору № 2/2017 от 06.03.2017 года, в частности:

- реализация способа управления ПЗС-матрицей со строчным переносом для обеспечения метода наблюдения со стробированием по дальности;
- алгоритм управления ПЗС-матрицей в активно-импульсном и комбинированном режимах.

Главный научный сотрудник
доктор технических наук

А.В. Корякин

«28» сентября 2021 г.