

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

*На правах рукописи*



Мовчан Андрей Кириллович

**МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПРЕЦИЗИОННОГО ИЗМЕРЕНИЯ  
ДАЛЬНОСТИ В АКТИВНО-ИМПУЛЬСНЫХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ**

Специальность 2.2.6. Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Курячий Михаил Иванович,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник

Томск – 2021

## Содержание

Введение.....	4
1 Активно-импульсные телевизионные измерительные системы.....	12
1.1 Описание предметной области .....	12
1.2 Активная зона видения АИ ТИС .....	15
1.3 АИ ТИС с использованием ЭОП.....	19
1.3.1 Классификация ЭОП.....	20
1.3.2 Принципы построения АИ ТИС с ЭОП.....	21
1.4 Принципы построения АИ ТИС без использования ЭОП.....	31
1.5 Времяпролетные камеры .....	35
1.6 Измерение дальности АИ ТИС.....	40
1.7 Выводы по главе 1.....	48
2 Многозонный метод измерения дальности .....	49
2.1 Описание метода и алгоритма многозонного измерения дальности.....	49
2.2 Алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции ММИД.....	58
2.3 Выводы по главе 2.....	62
3 Компьютерное моделирование многозонного метода измерения дальности.....	63
3.1 Оценка влияния формы оптического импульса подсвета пространства.....	63
3.2 Оценка влияния количества локальных АЗВ на потенциальную точность ММИД .....	71
3.3 Оценка влияния шума фотоприемника на потенциальную точность ММИД .....	73
3.4 Оценка влияния «джиттера» импульсов подсвета и стробирования на потенциальную точность ММИД.....	76
3.5 Программное обеспечение для моделирования процессов в АИ ТИС .....	80
3.6 Выводы по главе 3.....	81
4 Экспериментальное исследование ММИД в АИ ТИС.....	84
4.1 Экспериментальный макет АИ ТИС .....	84
4.2 Экспериментальное исследование ММИД.....	89

4.2.1 Экспериментальное исследование 20-ти зонного ММИД при измерении дальности до объекта .....	90
4.2.2 Экспериментальное исследование 20-ти зонного ММИД при измерении расстояний до группы объектов .....	97
4.3 Экспериментальные исследования влияния шума фотоприемника на точность измерения дальности в ММИД .....	101
4.4 Экспериментальное исследование АИ ТИС на полигоне.....	108
4.5 Экспериментальные исследования макета АИ ТИС в сложных условиях видения .....	113
4.6 Выводы по главе 4.....	115
Заключение .....	117
Сокращения, обозначения, термины и определения .....	119
Список использованных источников .....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	132
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	133

## Введение

### Актуальность работы

Современные технологии позиционирования объектов в пространстве включают в себя множество задач к которым можно отнести определение координат объектов, габаритов, скорости их перемещения. Актуальной задачей является дистанционное измерение дальности до объектов наблюдения. Вычисление дистанции до объекта для каждой точки его плоского изображения позволяет построить трехмерную картину положения объекта в пространстве.

Активный метод определения дальности может быть успешно применен для разработки систем, позволяющих оценивать дистанцию до объектов наблюдения. К таким системам относятся активно-импульсные телевизионные измерительные системы (АИ ТИС), основным применением которых является обнаружение и распознавание объектов в сложных условиях видения (дым, туман, дождь, снег и т.п.).

Принцип работы АИ ТИС заключается в подсвете объектов интереса лазерным излучателем и приеме отраженного излучения с задержками, соответствующими времени прохождения света до объекта и обратно. Таким образом, фотоприемник системы принимает световое отражение лишь от объектов интереса, при этом игнорируя отражение от помех. Такая особенность позволяет отсеять помеху обратного рассеяния в виде отраженного светового излучения от пыли, тумана, снега и т.п. Подавление помехи обратного рассеяния является одним из основных достоинств таких систем. Этот метод обеспечивает визуализацию пространства в виде узкого слоя, отсекая при этом близкие помехи и фон за объектом. Полученное изображение дает информацию об отражательной способности наблюдаемого объекта и расстоянии до него.

Конструктивные особенности и принципы работы АИ ТИС дают возможность измерять расстояния до объектов. Существующие способы определения дальности не соответствуют требованиям по точности измерений. Таким образом, поиск новых способов и алгоритмов прецизионного измерения дальности в АИ ТИС является весьма актуальной задачей.

Задачи, решаемые АИ ТИС, определяют основные сферы применения таких систем, к которым относятся навигация беспилотных транспортных средств, обеспечение безопасности вождения транспортных средств в сложных условиях видения, проведение поисково-спасательных работ, ориентирование на местности и многие другие.

### **Степень разработанности темы исследования**

В настоящее время ведутся исследования как в области разработки АИ ТИС, так и в области методов и алгоритмов для измерительных приложений, основанных на использовании таких систем. Исследованиям АИ ТИС посвящены работы многих известных отечественных и зарубежных ученых, таких как:

А.А. Лебедев, А.А. Голицын, А.А. Манцветов, А.К. Цыцулин, В.В. Белов, В.Г. Волков, В.В. Тарасов, И.Л. Гейхман, М.М. Бутслов, П.А. Дегтярев, П.Д. Гиндин, Ю.Г. Якушенко, Ю.К. Грузевич, Ю.Р. Кирпиченко, В.В. Капустин, D.B. Neumann, H. Heiselberg, L.F. Gillespie, M. Laurenzis, N.S. Kopeika, P. Mariani, S.Y. Chua, X. Wang.

Однако существующие методы и алгоритмы измерения дальности в АИ ТИС имеют небольшой диапазон измерения дальности (от 0,5 м до 5 м) и точность измерения  $\pm 0,05$  м, при этом имеют ярко выраженную зависимость точности измерений от форм управляющих импульсов и стабильности их временных параметров. Существующие методы и алгоритмы измерения дальности, обеспечивающие измерения в большом диапазоне (от 10 м до 100 м) имеют низкую точность измерения  $\pm 1$  м.

### **Объект и предмет исследования**

Объектом исследования являются активно-импульсные телевизионные измерительные системы. Предметом исследования являются методы и алгоритмы измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах.

## **Цель и задачи диссертационной работы**

Цель диссертационной работы – разработка методов и алгоритмов прецизионного измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать прецизионный метод измерения дальности в АИ ТИС с широким диапазоном определения расстояний до наблюдаемых объектов, обладающий невосприимчивостью к формам управляющих импульсов и нестабильностям их временных параметров.

2. Разработать программные модули для моделирования методов измерения дальности в АИ ТИС.

3. Провести моделирование известных, а также разработанного метода измерения дальности в АИ ТИС с учетом неидеальности форм управляющих импульсов, нестабильности их временных параметров и шума фотоприемника.

4. Провести экспериментальные исследования разработанного метода измерения дальности на макете АИ ТИС.

5. Разработать метод дополнительного повышения точности измерения с использованием коррекции нелинейности измерительной функции.

6. Провести экспериментальные исследования разработанного метода с дополнительным алгоритмом повышения точности измерения за счет коррекции нелинейности измерительной функции.

## **Научная новизна**

1. Разработан многозонный метод измерения дальности в АИ ТИС, отличающийся использованием нормированной динамической экспозиции фотоприемника по дальности, который позволяет увеличить диапазон определения расстояний до наблюдаемых объектов при заданной точности.

2. Разработан алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции в многозонном методе измерения дальности, основанный на оптимальном выборе значений задержек импульсов стробирования фотоприемника для формирования

его динамической экспозиции по критерию минимума среднеквадратической ошибки.

3. Определена потенциальная точность измерения дальности многозонным методом в АИ ТИС, с учетом форм импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприёмника, нестабильностей их временных параметров, а также влияния шума фотоприемника, что подтверждает возможность построения прецизионных «карт глубин» пространства.

### **Методы исследования**

В диссертационной работе применены экспериментальные и теоретические методы, заключающиеся в получении основных характеристик расчётным путём и последующем сравнении полученных данных с результатами натурных испытаний. Среди методов исследования применялись: теория математической статистики, методы цифровой обработки изображений, математическое моделирование.

### **Достоверность результатов**

Достоверность результатов обусловлена методологической обоснованностью исходных теоретических положений, обеспечена организацией опытно-экспериментальной работы с применением методов адекватных предмету, целям и задачам исследования, обеспечена согласованностью теоретических положений и выводов с экспериментальными данными и результатами, подтверждена устойчивой повторяемостью основных результатов научных исследований.

### **Теоретическая значимость**

1. Предложено аналитическое выражение для вычисления дальности до объектов многозонным методом измерения дальности в АИ ТИС.

2. Предложен алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции в многозонном методе измерения дальности.

3. Предложен алгоритм вычисления формы суммарной зоны видения для коррекции нелинейности измерительной функции в многозонном методе измерения дальности.

### **Практическая значимость**

1. Практическое использование разработанного многозонного метода измерения дальности в АИ ТИС позволяет уменьшить влияние форм и нестабильности временных параметров импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприемника на точность измерения дальности до объектов наблюдения.

2. Реализована программная модель измерения дальности в АИ ТИС, учитывающая формы и нестабильность временных параметров импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприемника.

3. Показана возможность повышения точности измерения дальности многозонным методом за счет коррекции нелинейности измерительной функции.

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

1. Разработанный многозонный метод измерения дальности в АИ ТИС позволяет повысить точность определения расстояний до наблюдаемых объектов в заданном диапазоне, в частности, при длительности импульса подсвета пространства 30 нс и импульса стробирования фотоприемника 130 нс в диапазоне измерения расстояний от 8 м до 22 м для 20-ти зонного метода измерения дальности получена точность 0,17 м, а в известном методе корреляции «расстояние-интенсивность» точность составила 0,88 м.

2. Разработанный алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции многозонного метода измерения дальности в диапазоне от 8 м до 20 м позволяет повысить точность измерения дальности в 2,5 раза, что подтверждено натурным экспериментом, в котором среднеквадратическая ошибка до коррекции составила 0,165 м, а после коррекции 0,066 м.

3. Потенциальная точность измерения дальности до объектов наблюдения 20-ти зонным методом в АИ ТИС составляет  $10^{-3}$  м с учетом реальных форм и нестабильностей временных параметров импульсов подсвета пространства и стробирования фотоприёмника, что подтверждено результатами компьютерного моделирования.

### **Личный вклад автора**

Задачи исследования были сформулированы совместно с научным руководителем работы, который оказывал консультативное содействие и осуществлял верификацию результатов в процессе выполнения работы. Личный вклад автора состоит в планировании и проведении экспериментальных исследований, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировании выводов, разработке программного обеспечения, подготовке и публикации докладов и статей. Все результаты получены автором лично или совместно с соавторами при его непосредственном участии.

### **Использование результатов исследования**

1. Проведение комплексных испытаний активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) и системы построения ортофотопланов местности беспилотным воздушным судном (СПОМБВС) на полигоне НИИ РТС ТУСУР.

2. НИР «Прецизионное томографическое видение объектов телевизионными измерительными системами с активно-импульсным подсветом пространства», грант РФФИ по научному проекту № 19-37-90141, 2019–2021 гг.

3. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» (шифр проекта 8.9562.2017/БЧ), 2017–2019 гг.

4. Проведение натурных испытаний лабораторного макета АИ ТИС с установкой на разработанный силами Альянса "Техническое зрение" в городе Томске беспилотный автомобиль, который в декабре 2019 г. принял участие в конкурсе «Зимний город» на полигоне в подмосковном городе Дмитров.

5. Проведение натурных испытаний лабораторного макета АИ ТИС в сложных условиях видения при низкой прозрачности среды распространения оптического излучения совместно с ООО «Софт Кристалл» г. Томск.

### **Апробация результатов исследования**

Основные положения данной работы докладывались и обсуждались в следующих конференциях.

1. Международная научно-практическая конференция «Распознавание 2017», Курск, 2017.
2. Международная научно-практическая конференция «Распознавание 2018», Курск, 2018.
3. XIV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2018.
4. XV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2019.
5. XVI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», Томск, 2020.
6. 28-ая Международная конференция по компьютерной графике, обработке изображений и машинному зрению «Графикон 2018», Томск, 2018.
7. International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Томск, 2019.
8. 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), Russia, 2020.

### **Публикации**

По результатам исследований опубликовано 18 работ: 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 статья в журнале, проиндексированном в Scopus, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 13 докладов в трудах международных конференций, 7 из которых проиндексированы в наукометрических базах Scopus и Web of Science,

### **Краткое содержание работы**

В главе 1 выполнен аналитический обзор литературы по теме диссертационного исследования, описаны особенности построения и принципы работы АИ ТИС, а также методы измерения дальности в АИ ТИС, сформулирована цель исследования и определены задачи исследования.

Во второй главе описан разработанный многозонный метод измерения дальности в АИ ТИС, а также алгоритм повышения точности измерения дальности многозонным методом.

В главе 3 дана оценка влияния формы оптического импульса и количества активных зон видения (АЗВ) на потенциальную точность многозонного метода. Приведены результаты моделирования влияния шума фотоприемника и джиттера длительности импульса подсвета пространства (ИПП) на потенциальную точность измерения дальности многозонным методом. Приведено описание разработанного программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов формирования зон в АИ ТИС и методов измерения дальности.

В главе 4 дано описание макета АИ ТИС и представлены результаты экспериментальных исследований измерения дальности многозонным методом. Также представлены результаты экспериментального исследования алгоритма повышения точности измерения дальности многозонного метода. Представлены результаты экспериментального исследования влияния шума фотоприемника на точность измерения дальности многозонным методом. Приведены результаты испытания макета АИ ТИС и измерения им дальности на полигоне НИИ РТС ТУСУР. Представлены изображения некоторых объектов на полигоне и полученные с помощью АИ ТИС «карты глубин» пространства. Представлено описание испытаний макета АИ ТИС в условиях пониженной прозрачности среды распространения оптического излучения проведенного в БАК Института оптики и атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН.

## **1 Активно-импульсные телевизионные измерительные системы**

### **1.1 Описание предметной области**

На сегодняшний день для обнаружения, наблюдения и измерения основных параметров объектов, а также построения их трехмерных визуализаций используются телевизионные системы (ТС) с импульсным методом наблюдения пространства [1].

Телевизионная система с импульсным методом наблюдения пространства и возможностью проведения измерений каких-либо параметров наблюдаемых объектов называется активно-импульсной телевизионной измерительной системой (АИ ТИС).

Импульсный метод наблюдения (рисунок 1.1) заключается в подсвете пространства оптическими импульсами определенной длительности, а также стробировании по времени отраженных оптических импульсов при их приеме на фотоприемнике. При этом для наблюдения какого-либо объекта, находящегося на определенном расстоянии от АИ ТИС он должен подсвечиваться оптическими импульсами подсвета пространства, причем длительность таких импульсов должна быть на много меньше времени распространения оптического излучения до объекта и обратно. Так же величина задержки между излучением импульса подсвета пространства (ИПП) и моментом открытия фотоприемника составляет время, необходимое излучению для распространения до объекта и обратно. В данном случае оператор такой системы будет видеть интересующий его объект и окружающий его участок пространства. Глубина этого наблюдаемого участка пространства соответствует времени открытого фотоприемника и длительности оптического ИПП [2]. При этом длительность оптического ИПП, может составлять от единиц до десятков наносекунд, что обеспечивает высокую мощность подсвета в импульсе и, следовательно, достаточного отношения сигнала к шуму в фотоприемнике, в свою очередь короткая экспозиция фотоприемника значительно уменьшает чувствительность системы к фоновому освещению. Благодаря работе системы в импульсном режиме длительная световая помеха (свет фар,

прожекторов, пламя костров и пр.) ослабляется пропорционально скважности работы системы.

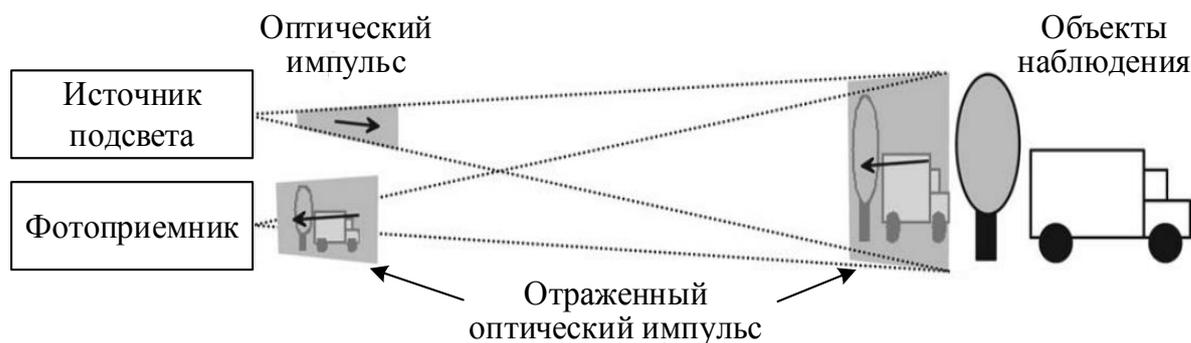


Рисунок 1.1 – Импульсный метод наблюдения

Импульсный метод наблюдения был предложен академиком А.А. Лебедевым в 1936 г. [3]. В дальнейшем этот метод был описан в зарубежной литературе, импульсный метод наблюдения называется методом стробирования по дальности (*Gated Viewing*) [4]. Для реализации этого метода наблюдения необходим импульсный источник оптических импульсов подсвета, излучающий очень короткие (1–100 нс) оптические импульсы излучения, а также фотоприемник с быстродействующим затвором. В первое время в качестве источника импульсов подсвета применялся ламповый прожектор, а в приемнике аппаратуры размещался электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Работа приемной части в импульсном режиме работы осуществлялась как установкой перед входом ЭОП затвора Поккельса или Керра, либо стробированием ЭОП по фотокатоду высоковольтным импульсным напряжением. Применение данных оптических затворов приводило к значительным потерям энергии, а для стробирования фотокатода по напряжению питания были необходимы ламповые электронные блоки, обладающие внушительной массой, размерами и потреблением энергии.

М.М. Бутслову и его коллективу в конце 40-х годов удалось создать специализированные импульсные ЭОП. Использование данных преобразователей позволило значительно упростить устройство блока стробирования и значительно снизить его энергопотребление, габариты и массу.

Первые работы по созданию активно-импульсных (АИ) систем видения в СССР были начаты еще в 1950 году под руководством А.А. Лебедева.

В первых разработках в качестве устройства подсвета пространства использовали специальный прожектор, реализованный на базе аргоновой импульсной лампы и отражателя диаметром 1,5 м. Частота вспышек составляла до 800 Гц, а средняя мощность излучения до 2–3 кВт.

Большой скачок в развитии АИ систем видения был достигнут в начале 60-х годов благодаря созданию лазеров и освоению малогабаритных устройств подсвета на них. Лазеры по сравнению с искровыми источниками обладают множеством преимуществ. К основным преимуществам лазеров перед искровыми источниками возможно отнести: высокую направленность и яркость излучения, монохромность излучения, которая позволяет применять в приемнике узкополосные фильтры, отсекающие световые помехи и фоны, короткую длительность импульсов оптического излучения (1–100 нс). Однако только с появлением импульсных лазерных полупроводниковых излучателей (ИЛПИ) удалось достичь высоких массогабаритных показателей, а также низкого энергопотребления устройств подсвета пространства в АИ ТИС.

В 1962 – 1964 гг. в НИИ прикладной физики была разработана экспериментальная АИ ТИС с использованием ИЛПИ. Первый образец ИЛПИ требовал охлаждения жидким азотом, что требовало использовать газовую холодильную машину. Это серьезно ограничивало применение таких приборов.

В начале 70-х годов появились образцы ИЛПИ, не нуждающиеся в жидкостном охлаждении, и объединение излучателей в массивы решеток позволило достигнуть таких мощностей излучения, которые достаточны для достижения необходимой дальности действия систем [5].

В настоящее время ведутся активные разработки образцов АИ ТИС, как у нас в стране, так и за рубежом.

К основным достоинствам АИ ТИС за счет импульсного метода работы является устранение помехи обратного рассеивания, а также значительное ослабление световых помех естественной и искусственной природы. Таким образом АИ ТИС позволяют производить наблюдение объектов как в нормальных, так и в сложных условиях наблюдения: в солнечный день, в сумерки и ночью, при

ограниченной или низкой прозрачности среды распространения излучения, при наличии дымки, тумана, различных осадков, естественных и искусственных световых помех [7].

АИ ТИС позволяют наблюдать только определенные по дальности объекты благодаря селекции изображения по дальности в пределах узкой глубины просматриваемого пространства. Отсечка фона и изображения посторонних объектов, расположенных вне зоны выделения, способствует повышению вероятности правильной идентификации объектов наблюдения [7].

АИ ТИС можно отнести к многоточечному лазерному локатору (твердотельному лидару) способному производить измерение дальности до наблюдаемых объектов, а также производить построение «карты глубины» наблюдаемого пространства. В зарубежной литературе АИ ТИС принято называть *RGIS (Range-Gated Active Imaging System)* [8–11].

АИ ТИС, позволяющую строить трехмерные визуализации наблюдаемого пространства принято называть *3D flash LiDAR* [12–20].

Исходя из возможностей АИ ТИС, можно определить основные области применения таких систем – это сфера обеспечения безопасности объектов, видеонаблюдение, вождение транспортных средств, проведение поисково-спасательных работ, работа пограничных и таможенных служб, ориентирование на местности, в том числе ориентации в пространстве автономных беспилотных аппаратов, измерении габаритных размеров объектов и их трехмерное сканирование [22, 23].

## **1.2 Активная зона видения АИ ТИС**

Активная зона видения (АЗВ) АИ ТИС – это видимая часть пространства измерительной системой при заданных временных параметрах сигналов оптического ИПП и импульса стробирования фотоприемника (ИСФ). В зарубежных источниках АЗВ имеет свое название как *RIP (Range Intensity Profile)* [23–29]. АЗВ и ее основные параметры лежат в основе методов определения дальности с помощью АИ ТИС.

АЗВ характеризуется формой, протяженностью и местоположением в пространстве. Форма или профиль АЗВ описывает относительное распределение отраженной оптической энергии по всей своей протяженности в пространстве. Форма АЗВ определяется формами и соотношением длительностей импульсов оптического излучения и стробирования фотоприемника, а также параметрами среды распространения.

В общем случае форму АЗВ можно представить, как свертку оптического сигнала ИПП с формой ИСФ. Таким образом энергию, поступающую на фотоприёмник от объекта наблюдения находящегося на расстоянии  $d$  от системы можно определить следующим образом:

$$E(d) = \frac{\exp(-\alpha d)}{d^2} \cdot \int_0^{\tau_g + \tau_d} S_l(t) S_g(t - \frac{2d}{c}) dt, \quad (1.1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент ослабления среды распространения;

$d$  – расстояние до объекта наблюдения;

$\tau_g$  – длительность ИСФ;

$\tau_d$  – задержка ИСФ;

$S_l(t)$  – сигнал оптического ИПП;

$S_g(t)$  – сигнал ИСФ;

$c$  – скорость света.

Вычитаемое в аргументе функции ИСФ  $S_g(t)$  представляет собой задержку стробирования  $\tau_d$  данного импульса относительно начала излучения оптического ИПП  $S_l(t)$ .

На практике представляет интерес форма и местоположение в пространстве АЗВ неподверженная искажению средой распространения и ослаблением вызванным законом обратных квадратов. То есть форма АЗВ, зависящая исключительно от заданных форм ИПП и ИСФ. Для этого необходимо рассчитать свертку сигналов (1.1) приняв дробь перед интегралом равной единице.

При этом можно выделить три случая, которые соответствуют различным соотношениям по длительности между ИСФ и оптическим ИПП. Далее предполагается прямоугольная форма ИПП  $S_l(t)$  и ИСФ  $S_g(t)$ .

На рисунке 1.2 представлена форма АЗВ при равных длительностях ИПП и ИСФ.

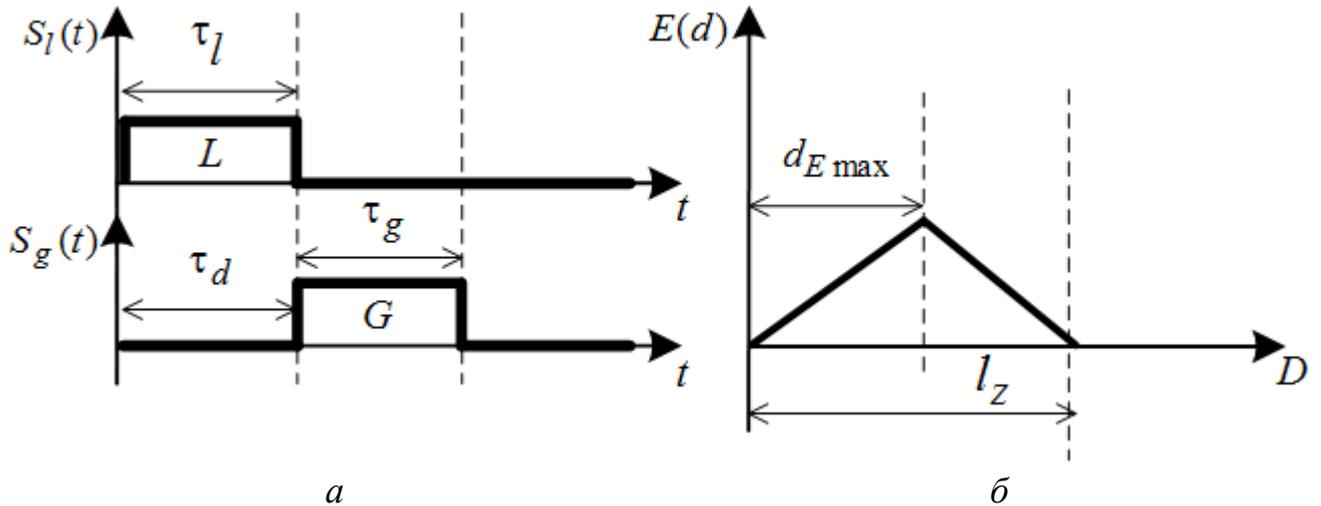


Рисунок 1.2 – Форма АЗВ при равных ИПП и ИСФ (*a* – сигналы подсвета и стробирования; *b* – форма АЗВ)

В случае, представленном на рисунке 1.2 форма АЗВ представляет собой равнобедренный треугольник. Местоположение АЗВ в пространстве определяет положение видимой части пространства по дальности. Местоположение АЗВ в пространстве определяется задержкой  $\tau_d$  импульса стробирования фотоприёмника относительно импульса оптического излучения. При этом в случае треугольной формы АЗВ задержка стробирования  $\tau_d$  определяет расстояние  $d_{E_{max}}$  на котором производится прием максимальной энергии в данной АЗВ.

Расстояние  $d_{E_{max}}$  определяется согласно следующему выражению:

$$d_{E_{max}} = \frac{\tau_d \cdot c}{2}. \quad (1.2)$$

Протяженность или глубина АЗВ  $l_z$  определяет максимальную глубину пространства по дальности в котором возможен прием отраженной оптической энергии. Протяженность или глубина АЗВ определяется суммарной длительностью импульсов оптического излучения  $\tau_l$  и стробирования фотоприемника  $\tau_g$  согласно следующему выражению:

$$l_z = \frac{(\tau_g + \tau_l) \cdot c}{2}. \quad (1.3)$$

На рисунке 1.3 представлена форма АЗВ при разных длительностях ИПП и ИСФ. При этом длительность ИПП  $\tau_l$  меньше длительности ИСФ  $\tau_g$ .

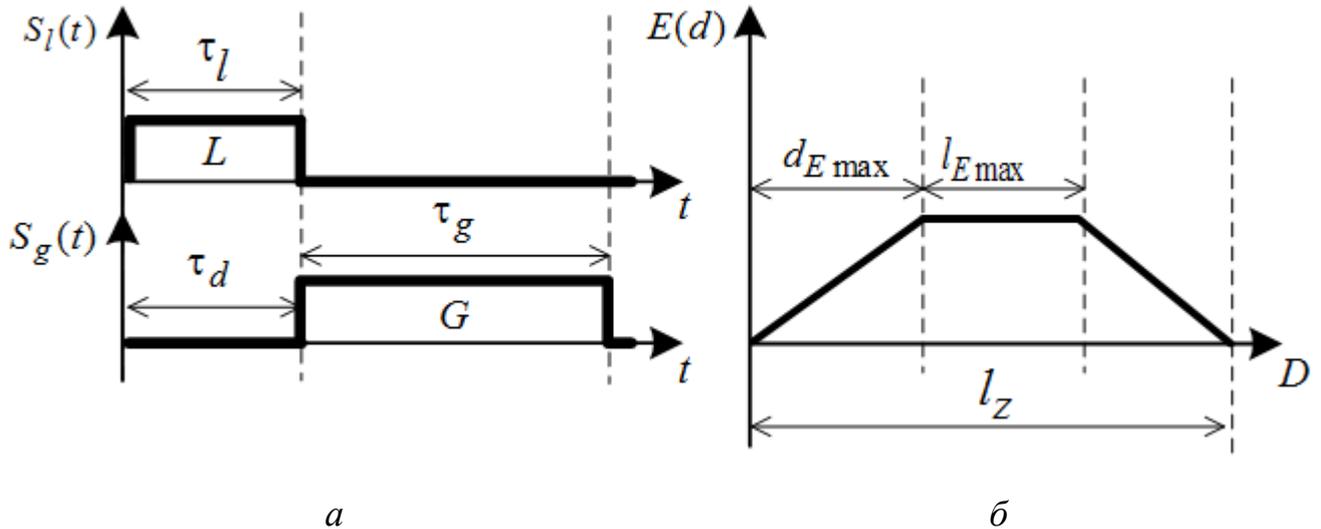


Рисунок 1.3 – Форма АЗВ при длительности ИПП меньше длительности ИСФ (*a* – сигналы подсвета пространства и стробирования фотоприемника; *б* – форма АЗВ)

В случае, представленном на рисунке 1.3 форма АЗВ представляет собой трапецию при этом расстояние  $d_{E\max}$  до области с максимальной энергией такое же, как и предыдущем случае, однако в данном случае область с максимальной энергией имеет протяженность  $l_{E\max}$ , которая определяется разностью длительности ИСФ  $\tau_g$  и длительности ИПП  $\tau_l$  согласно следующему выражению:

$$l_{E\max} = \frac{(\tau_g - \tau_l) \cdot c}{2}. \quad (1.4)$$

На рисунке 1.4 представлена форма АЗВ при разных длительностях ИПП и ИСФ. При этом длительность ИПП  $\tau_l$ , больше длительности ИСФ  $\tau_g$ .

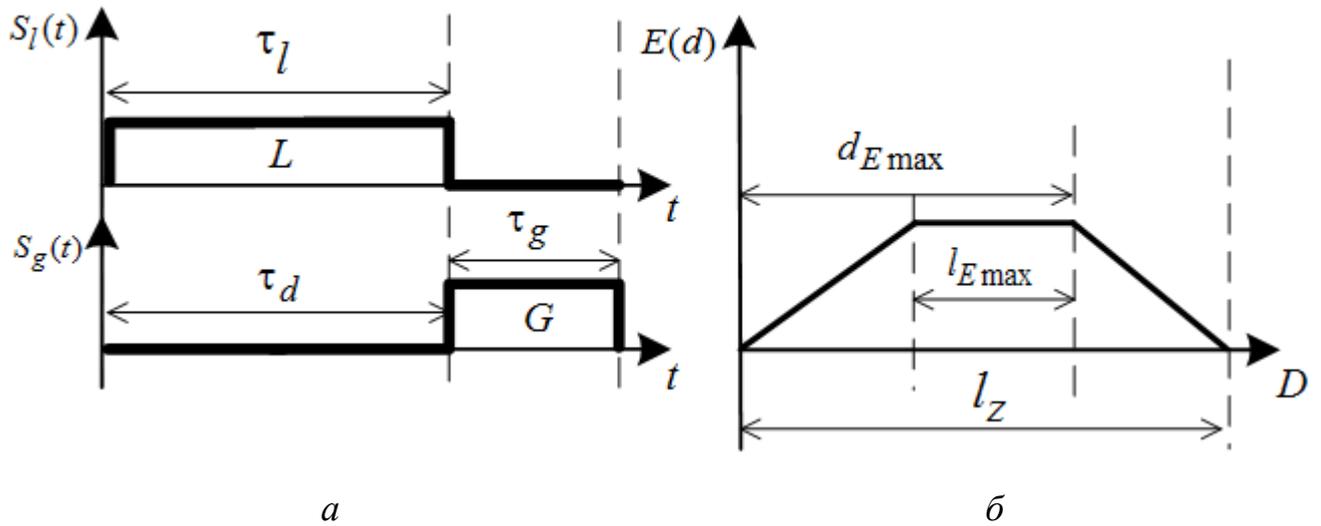


Рисунок 1.4 – Форма АЗВ при длительности ИПП больше длительности ИСФ (*a* – сигналы подсвета пространства и стробирования фотоприемника; *б* – форма АЗВ)

В случае, представленном на рисунке 1.4 форма АЗВ представляет собой трапецию при этом в отличие от предыдущего случая расстояние  $d_{E\max}$ , определяемое задержкой стробирования  $\tau_d$  согласно (1.2) в данном случае является окончанием области максимальной энергии в данной АЗВ.

### 1.3 АИ ТИС с использованием ЭОП

Далее представлено описание электронно-оптических преобразователей и дана их классификация. Описан принцип построения АИ ТИС использующих в качестве быстродействующего оптического затвора ЭОП. Уделено внимание структуре устройства подсвета и импульсному излучателю, применяемому в АИ ТИС.

ЭОП является электровакуумным оптико-электронным прибором, основное предназначение которого является усиление яркости изображений, наблюдаемых через него объектов. Это обусловило применение ЭОП в приборах ночного видения (ПНВ). Также благодаря своему принципу работы ЭОП позволяет управлять пропусканием входного оптического потока. По этой причине ЭОП используется в активно-импульсных телевизионных системах в качестве быстродействующего оптического затвора.

### 1.3.1 Классификация ЭОП

На данный момент ЭОП классифицируют на шесть поколений (от 0 до V) и две переходные модификации (I+, II+).

Первый вариант ЭОП поколения 0 был разработан в бюро исследований фирмы “Филипс” (Голландия) в 1934 год Холстом с соавторами. Поэтому первый вариант ЭОП известен как “стакан Холста”. ЭОП 0 поколения представляют собой одно, двух или трехкамерный ЭОП с многощелочным или кислородно-серебряно-цинковым фотокатодом, они имеют стеклянный корпус, требующий защитный кожух, и вынесенный источник питания. Так как излучение с фотокатода рассеивается на стекле, изображение имеет низкий контраст. Разрешающая способность в центре в 5 раз выше, чем по краям.

ЭОП I поколения представляет собой одно, двух или трехмодульный ЭОП с многощелочным фотокатодом. Они имеют металлокерамический корпус, со встроенным высоковольтным источником питания и волоконно-оптическими деталями на входе и выходе ЭОП для стыковки модулей. Модули ЭОП являются заменяемыми в случае выхода из строя. Металлокерамический корпус не влияет на контраст изображения, в отличие от стеклянного и обладает более высокой прочностью.

ЭОП II поколения представляет собой одномодульный ЭОП с многощелочным фотокатодом и микроканальной пластиной (МКП) в металлокерамическом корпусе. Он имеет перевернутое изображение на фотокатод, которое оборачивается при помощи оптики ЭОП (инверторный тип ЭОП). Усиление одного ЭОП II поколения сопоставимо с трехмодульным ЭОП I поколения, при этом он имеет меньшую массу и размеры [30].

ЭОП II+ поколения представляет собой бипланарный (прямой перенос изображения с фотокатода на экран) ЭОП с МКП в металлокерамическом корпусе и встроенным высоковольтным источником питания [31].

ЭОП II++ поколения в отличие от II+ поколения использует многощелочной фотокатод с повышенной интегральной чувствительностью.

ЭОП III поколения использует фотокатод с отрицательным электронным сродством на основе арсенида галлия GaAs (индий-галлий арсенид InGaAs для поколения III+), имеющий повышенную чувствительность, а также ионно-барьерную пленку, защищающую фотокатод от воздействия положительно заряженных ионов. При этом ионно-барьерная пленка вызывает снижение отношения сигнала к шуму [32]. За счет передовых технологических достижений в ЭОП поколения IV обеспечена более высокая квантовая эффективность в более широкой части участка спектра как видимой его части, так и части ближнего ИК. В ЭОП поколения IV используются тонкопленочные МКП с уменьшенным диаметром микроканалов равным 6 мкм вместо стандартных 12 мкм. Это позволило поднять его разрешающую способность до 64–84 штр/мм. Отличительной особенностью данных ЭОП является также наличие в нем управляемого высоковольтного источника питания для работы при разном уровне освещенности в импульсном режиме.

На данный момент времени активно и плодотворно идут работы по созданию ЭОП поколения V и, как известно из опубликованных данных, люминофорный экран в таких ЭОП будет заменен на электронночувствительную ПЗС-матрицу. Так же видеосигнал с выхода такой матрицы будет обрабатывается интегрированным в ЭОП процессором и далее будет отображен на микродисплее [33].

### 1.3.2 Принципы построения АИ ТИС с ЭОП

Наиболее распространено применение в АИ ТИС различного назначения ЭОП поколения II+, благодаря их относительно невысокой стоимости и приемлемых характеристик изображения. В зарубежной литературе АИ ТИС с ЭОП также называют *ICCD (Intensified Charge-Coupled Device)* [34].

На рисунке 1.5 представлено схематическое изображение конструкции ЭОП поколения II+ наиболее часто используемого в АИ ТИС.

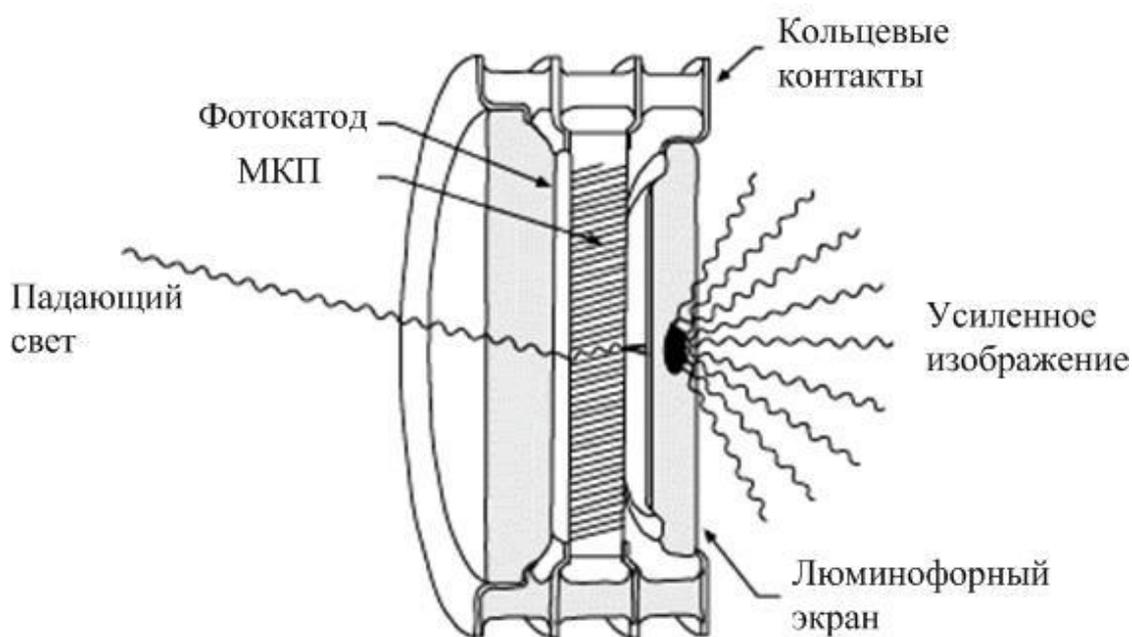


Рисунок 1.5 – Схематичное изображение конструкции ЭОП поколения П+

Благодаря своим преимуществам использование ЭОП в качестве оптического затвора в АИ ТИС во множестве применений остаётся востребованным и в настоящее время. К основным преимуществам ЭОП, обуславливающих их применение в АИ ТИС, можно отнести следующее: возможность временного стробирования входного оптического потока, т.е. работа в качестве оптического затвора; достижимы малые времена переключения оптического затвора на базе ЭОП, составляющие единицы наносекунд и даже сотни пикосекунд; возможность многократного усиления входного оптического потока до  $10^4$ – $10^5$  раз. На рисунке 1.6 представлена структурная схема оптического приемного тракта АИ ТИС с ЭОП.

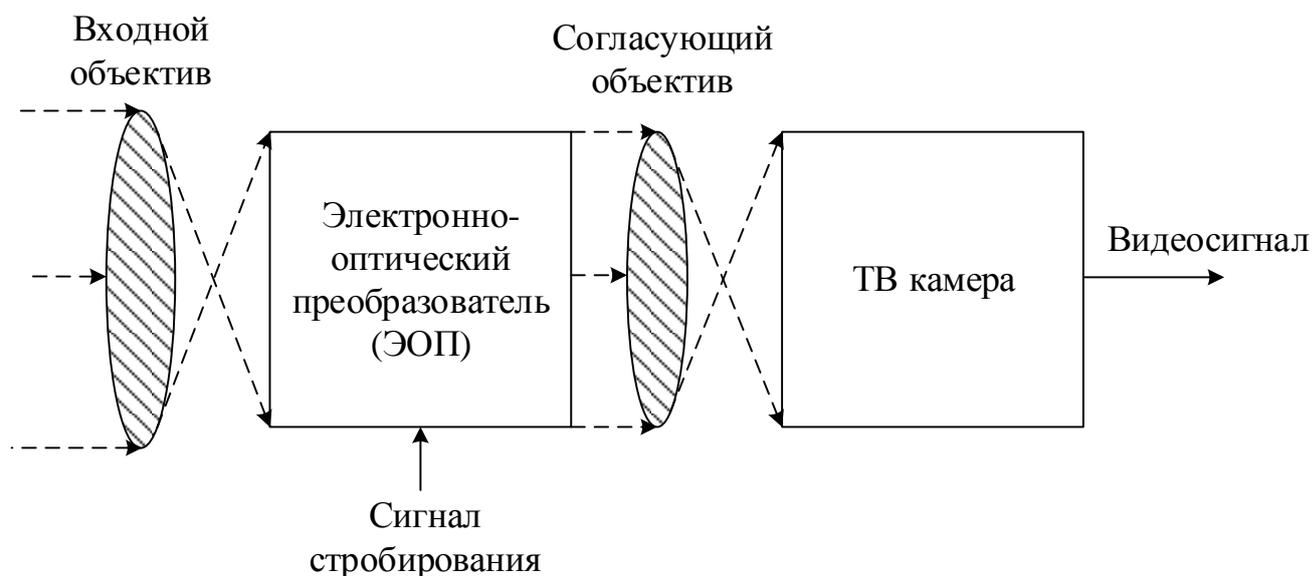


Рисунок 1.6 – Структурная схема приемного оптического тракта АИ ТИС с ЭОП

Представленная на рисунке 1.6 структурная схема приемного тракта имеет наиболее распространённое линзовое согласование ЭОП с матрицей ТВ камеры. В данной схеме отраженное от объектов наблюдения оптическое излучение фокусируется входным объективом на фоточувствительной поверхности фотокатода ЭОП. При наличии на управляющем электроде ЭОП отпирающего сигнала фотоэлектронный поток с выхода фотокатода поступает на электронный усилитель из микроканальных пластин (МКП), далее усиленный поток электронов поступает на люминофорный экран, где преобразуется в световой поток, являющийся выходным сигналом ЭОП. Усиленный световой поток с выхода ЭОП фокусируется согласующей оптикой на фоточувствительной поверхности матрицы телевизионной камеры, которая в свою очередь формирует видеосигнал. Применение для переноса изображения с ЭОП на ТВ камеру дополнительной линзовой оптической системы, в роли которой обычно используется проекционный объектив, приводит к определённым потерям энергии светового потока, а также дополнительным координатным искажениям изображения [27]. Известен способ оптического согласования ЭОП с матрицей ТВ камеры через оптоволоконный диск (фокон, фоклин) при котором сформированное на выходе ЭОП изображение поступает на матрицу через множество сгруппированных вместе оптоволоконных

нитей выполняющих роль отдельных световодов [2]. При соединении матрицы с ЭОП через фокон ослабление светового потока много меньше чем при использовании согласующего объектива, однако конструкция с фоконом имеет бóльшую стоимость. Также при передаче через фокон имеется некоторое падение контраста передаваемого изображения и даже появление муара в выходном изображении [28]. Наиболее прогрессивным способом переноса изображения с ЭОП на матрицу ТВ камеры является установка матрицы непосредственно в ЭОП после МКП. Данный способ согласования имеет наименьшие потери и искажения при передаче изображения, однако он пока не получил широкого распространения в связи с технологической сложностью производства и связанной с этим высокой стоимостью [29].

В АИ ТИС сигнал стробирования ЭОП подается как правило, на пластину фотокатода относительно пластины входа МКП, т.е. на промежуток фотокатод–МКП. Данный способ стробирования ЭОП является наиболее предпочтительным по двум причинам. Во-первых, так обеспечивается наибольшая долговечность работы ЭОП, поскольку данным способом стробирования реализуется его полное запираение, что приводит к меньшему времени его активной работы. Во-вторых, данное управление является самым низковольтным (300 вольт против 900 вольт на промежутке вход МКП–выход МКП и 5 кВ на промежутке выход МКП–экран) из существующих способов управления ЭОП, что упрощает конструкцию формирователя импульсов стробирования особенно при малых временах переключения.

Материал фотокатода обладает весьма малой проводимостью и при производстве ЭОП наносится на внутреннюю поверхность его входного окна.

При этом учитывая малое расстояние между фотокатодом и МКП данный промежуток представляет собой электрическую емкость, которая в совокупности с высоким удельным электрическим сопротивлением материала фотокатода образует с ним распределенную по поверхности фотокатода  $RC$ -цепь. Данная  $RC$ -цепь по входу стробирования ЭОП имеет большую величину постоянной времени и препятствует быстрому переключению ЭОП.

Минимально возможное время переключения ЭОП при стробировании по фотокатоду составляет 25 нс. Для дальнейшего повышения быстродействия, на поверхность фотокатода наносится слой никеля, который значительно увеличивает проводимость фотокатода и тем самым реализует малые времена стробирования. Испытания показывают, что для ЭОП со слоем никеля на фотокатоду время стробирования достигает 2 нс. Однако в этом случае слой никеля снижает квантовую эффективность фотокатода. Значительно более высокая проводимость обеих сторон МКП позволяет стробировать ЭОП непосредственно управляя в импульсном режиме МКП причем значительно быстрее, чем по фотокатоду. Времена стробирования ЭОП по электродам МКП составляет от 3 нс до 10 нс, причем без ухудшения квантовой эффективности [34].

Для эффективного стробирования ЭОП поколения П+ по фотокатоду необходимо формировать импульсы малой длительности 30–200 нс с амплитудой 200–300 В, при этом для полного запираания фотокатода необходимо приложение обратной полярности порядка 20–50 В.

При стробировании ЭОП длительность отпирающего импульса определяется временем экспозиции кадра АИ ТИС. Число фотонов, попавших за это время на фотокатод определяет значение яркости (энергии) регистрируемого изображения какого-либо объекта относительно его положения в АЗВ согласно выражению (1.1). С люминофорного экрана ЭОП пропорционально коэффициенту усиления излучается соответствующее число фотонов. Из-за инерционности люминофора время, в течение которого они излучаются, может значительно превышать длительность экспозиции [35].

ТВ камера в современных АИ ТИС обычно использует видеодатчик на основе ПЗС или КМОП матрицы. Принципы действия и характеристики современных матриц ПЗС и КМОП матриц рассмотрены в [36, 37].

ПЗС и КМОП-датчики представляют собой матрицу с фоточувствительной поверхностью образованной набором фоточувствительных приемников-пикселей, преобразующих энергию оптического сигнала в заряд. Пиксели ПЗС и КМОП матрицы состоят из металл-диэлектрик-полупроводника (МДП-конденсатор),

поверх которого устанавливается фотодетектор, в качестве диэлектрика используют беспримесный полупроводник (оксид алюминия), наносимый на подложку. Пройдя через собирающую линзу, фотон попадает на поверхность МДП-конденсатора. Поглощаясь, фотон порождает электронно-дырочную пару, которая «разделяется» в ячейке под действием внешнего электрического поля. После чего электрон попадет в потенциальную яму МДП-конденсатора для дальнейшего считывания.

Далее накопленный за время экспозиции в потенциальной яме заряд в ПЗС-матрице впоследствии передается по ее структуре с дальнейшим преобразованием в видеосигнал на выходе матрицы. В КМОП-матрице заряд в каждом пикселе преобразуется в уровень напряжения, там же усиливается и оцифровывается после чего код определяющий уровня заряда в данном пикселе мультиплексируется на выходную шину матрицы.

Для большинства применений, несмотря на меньшую чувствительность КМОП-камеры предпочтительнее ПЗС-камеры. Как правило они, по сравнению с ПЗС-камерами, обладают более широким динамическим диапазоном и более высоким быстродействием [38].

Для эффективной работы в активно-импульсном режиме помимо быстродействующего оптического затвора для подсветки пространства необходим мощный быстродействующий источник оптических импульсов. В качестве таких источников подсвета в АИ ТИС обычно используются источники ИК-диапазона. Обычно, это лазерные или светодиодные источники. Использование источников подсвета ИК-диапазона обусловлено меньшим ослаблением излучения в атмосфере, возможностью скрытного наблюдения и, например, необходимостью исключить возможность ослепления водителей встречных автомобилей [39].

В качестве излучателя устройства подсвета АИ ТИС чаще всего применяется импульсный лазерный полупроводниковый излучатель (ИЛПИ), представляющий собой решетку лазерных диодов ИК-диапазона и оптический интегратор, необходимый для формирования равномерного поля подсвета. На рисунке 1.7 представлена типовая структурная схема источника подсвета АИ ТИС.

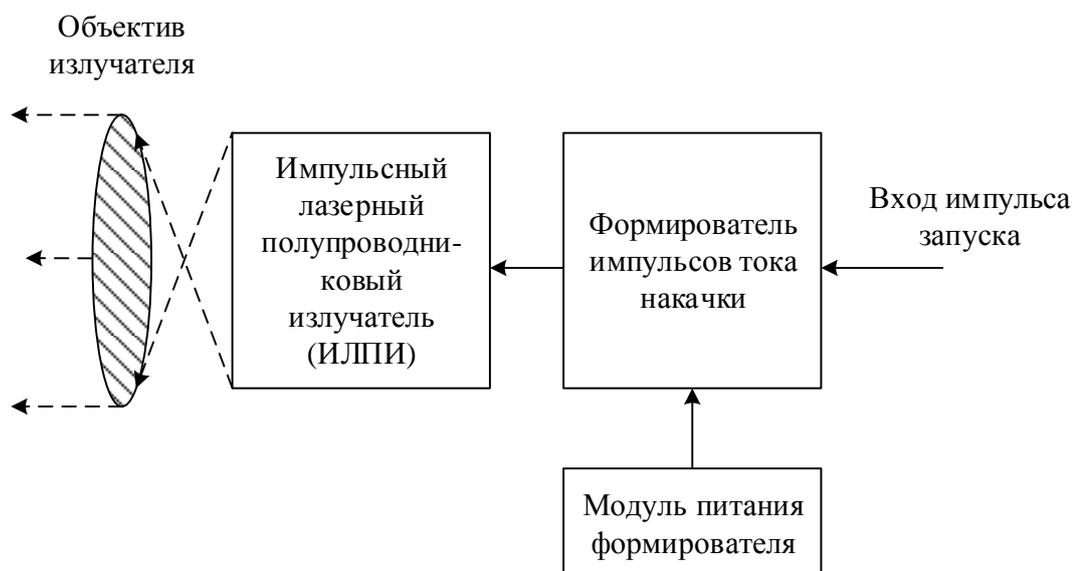


Рисунок 1.7 – Структурная схема источника подсвета АИ ТИС

Согласно структурной схеме, представленной на рисунке 1.7 входной импульс запуска поступает на формирователь коротких (10–100 нс) сильноточных (10–40 А) импульсов накачки тока. Оптическое излучение с выхода излучателя поступает на формирующую оптическую систему для фокусировки излучения. В качестве формирующей оптической системы часто используют проекционные светосильные объективы, линзы Френеля или конденсоры [2].

В качестве ИК излучателя в подсвете может применяться лазерная решетка Л-13 (рисунок 1.8), которая имеет импульсную мощность лазерного излучения 320 Вт и длину волны излучения 840–860 нс, угол подсвета  $12^\circ$ , частоту повторения импульсов 5–10 кГц.



Рисунок 1.8 – Решетка лазерных диодов Л-13

Лазерная решетка Л-13 при подаче прямоугольного импульса тока накачки имеет конечное время нарастания излучаемого оптического импульса в результате чего его форма становится ассиметричной. На рисунке 1.9 представлена форма оптического импульса решетки лазерных диодов Л-13 при величине тока накачки равной 30 А и его длительности 100 нс.



Рисунок 1.9 – Форма оптического импульса Л-13  
(длительность 100 нс, ток накачки 30 А)

Согласно принципу формирования изображения в АИ ТИС, ассиметричная форма оптического ИПП внесет свой вклад в форму АЗВ, что следует учитывать при проектировании таких систем и разработке алгоритмов управления для них, особенно при использовании систем непосредственно в измерительном применении.

В качестве излучателя источника подсвета АИ ТИС могут служить ИК светодиоды, однако они уступают вышерассмотренному ИЛПИ по мощностным характеристикам. В связи с чем при их использовании потребуется групповое включение множества таких приборов, а это в свою очередь значительно усложняет формирующую оптическую систему устройства подсвета.

В работах [40–42] подробно описаны варианты реализаций и технические характеристики, производимых лазерных и светодиодных излучателей.

На рисунке 1.10 представлена структурная схема АИ ТИС, использующая в качестве оптического затвора ЭОП.

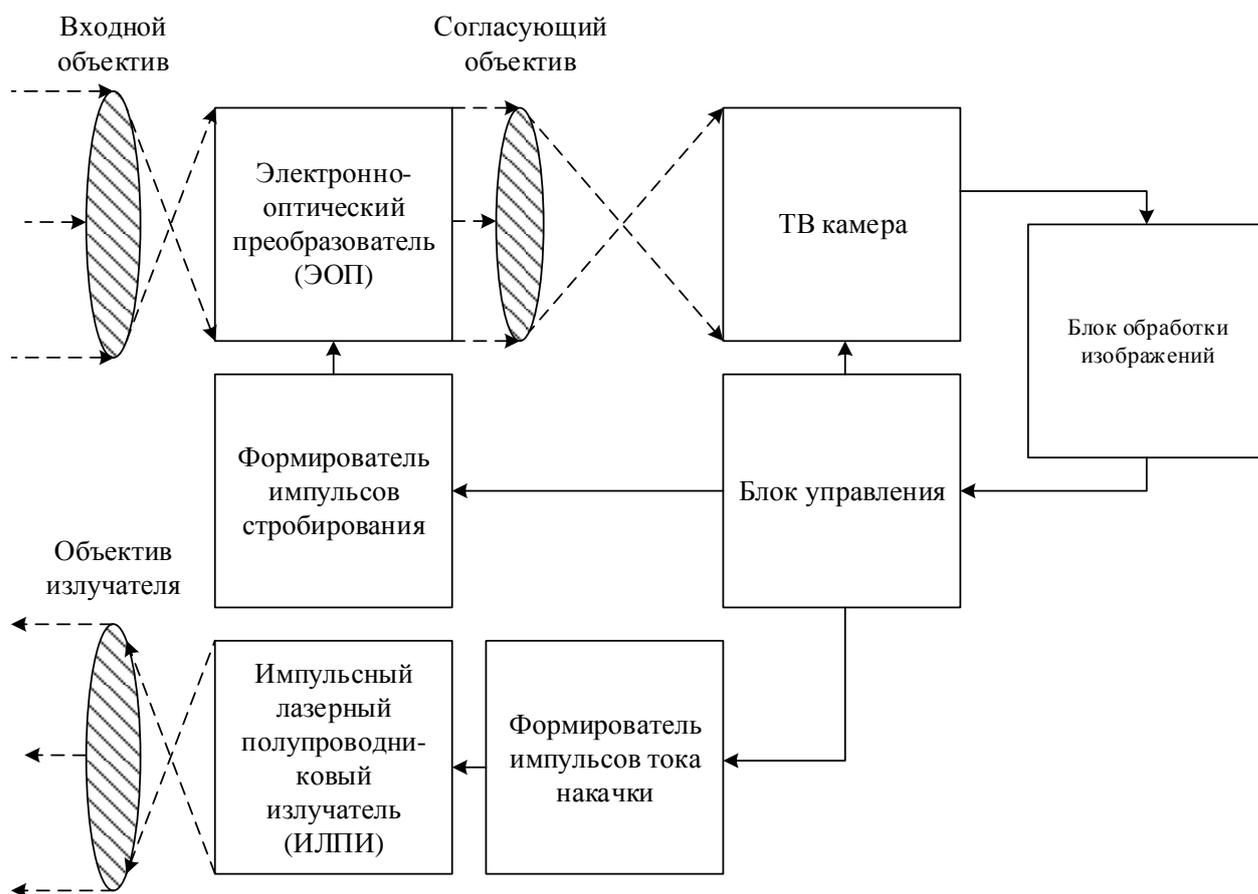


Рисунок 1.10 – Структурная схема АИ ТИС на базе ЭОП

Согласно структурной схеме, представленной на рисунке 1.10 в состав АИ ТИС, входят следующие блоки:

- входной оптический блок с объективом, формирующим поле зрения системы, диафрагмой для регулировки светового динамического диапазона и оптическим фильтром для спектральной селекции и подавления фоновых засветок;
- ЭОП с МКП, как быстродайствующий оптический затвор с усилением яркости изображения;
- согласующий объектив для переноса изображения с экрана ЭОП на фоточувствительную поверхность матрицы ТВ-камеры;
- блок обработки изображений, для выполнения вычислительных и или иных операций над поступающими видеоданными;
- блок управления для формирования согласно заданному алгоритму работы системы сигналов управления;
- формирователь импульсов стробирования ЭОП;

- формирователь импульсов накачки тока для излучателя;
- импульсный лазерный полупроводниковый излучатель;
- объектив излучателя, формирующий углы подсвета пространства.

В состав блока обработки изображений могут входить монитор, для отображения изображений поля зрения системы и необходимых видеоданных, персональный компьютер для обработки, формирования, хранения, передачи и приема изображений или команд управления.

В настоящее время ведутся активные разработки образцов АИ ТИС для наблюдений и измерений, как у нас в стране, так и за рубежом.

НПП «Наноскан» занимается разработкой и производством стробируемых электронно-оптических камер (ЭОК) и многокамерных комплексов на базе ЭОП второго и третьего поколений. Приборы предназначены в основном для сверхскоростной съемки быстропротекающих процессов в научной отрасли. К приборам выпускаемым фирмой можно отнести электронно-оптическую стробируемую камеру НАНОГЕЙТ-24, помехоустойчивую ЭОК ВС2, ПФК-1 и универсальную сверхпомехоустойчивую ЭОК СПУ-2 [43].

В АО «Катод», занимающемся в основном производством отечественных ЭОП, разработали АИ ТИС «ПАИН», предназначенную для помощи в управлении автотранспортом в ночное время и плохих погодных условиях при пониженной прозрачности атмосферы. Данная система имеет дальность действия до 200 м, и угол поля наблюдения 16x12 градусов. Система использует в качестве стробируемого фотоприёмника ЭОП поколения II+ или III. В качестве устройства подсвета используется двухмодульная система, состоящая из двух ИК ИЛПИ [44].

НПО «Геофизика-НВ» представляет свою АИ ТИС с повышенной дальностью действия. В приборе используется поколения ЭОП III с интегральной чувствительностью 1750 мкА/лм. Основные характеристики системы, следующие: рабочий диапазон освещенности – от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $5 \cdot 10^{-4}$  люкс; угол зрения поля днем  $1,1 \times 1,5^\circ$ ; дальность действия по группе людей – 1–2 км; масса 11 кг; габариты 350×310×230 мм [45].

Из зарубежных систем можно выделить канадскую АИ ТИС «ARGC-2400».

Данная система обладает максимальной дальностью распознавания объектов до 10 км. Особенностью данной системы является ее многоканальность.

Таким образом при наблюдении в дневное время задействуются 2 видеодатчика с широким и узким углом поля зрения. Для видения в ночное время задействуется канал, реализованный на базе ЭОП поколения III и ИЛПИ, работающий в ИК-диапазоне спектра [46].

#### **1.4 Принципы построения АИ ТИС без использования ЭОП**

В АИ ТИС использующих в качестве оптического затвора ЭОП помимо очевидных преимуществ существуют также и некоторые недостатки к которым можно отнести следующие:

- ограниченный ресурс работы ЭОП, вызванный истощением фотокатода особенно при эксплуатации с засветками его яркими источниками света;
- наличие согласующей оптики, ограничивающую общую чувствительность системы и повышающую ее стоимость, и массогабаритные показатели;
- наличие источников высоковольтного питания ухудшающих надежность, и массогабаритные показатели.

На сегодняшний день на основании вышеописанных недостатков ЭОП активно разрабатываются АИ ТИС, где в качестве стробируемого фотоприемника выступает, например, ПЗС или КМОП-матрица [47]. Такая технология приводит к улучшению массогабаритных показателей системы и повышению качества получаемых изображений [48], однако при этом АИ ТИС имеет меньшую чувствительность, чем система с применением ЭОП.

На рисунке 1.11 представлена структурная схема АИ ТИС не имеющая в своем составе ЭОП и использующая в качестве стробируемого фотоприемника ТВ датчик на основе ПЗС-матрицы. Основные отличия данной схемы от схемы, представленной на рисунке 1.10 заключаются в том, что формирователь высоковольтных импульсов стробирования заменен формирователем сигналов управления импульсной экспозиции матрицы ТВ датчика. Данный формирователь генерирует необходимые сигналы как для работы матрицы в обычном режиме

(вывод изображения), так и для ее работы как оптического затвора, запоминающего стробируемые изображения для их последующего вывода.

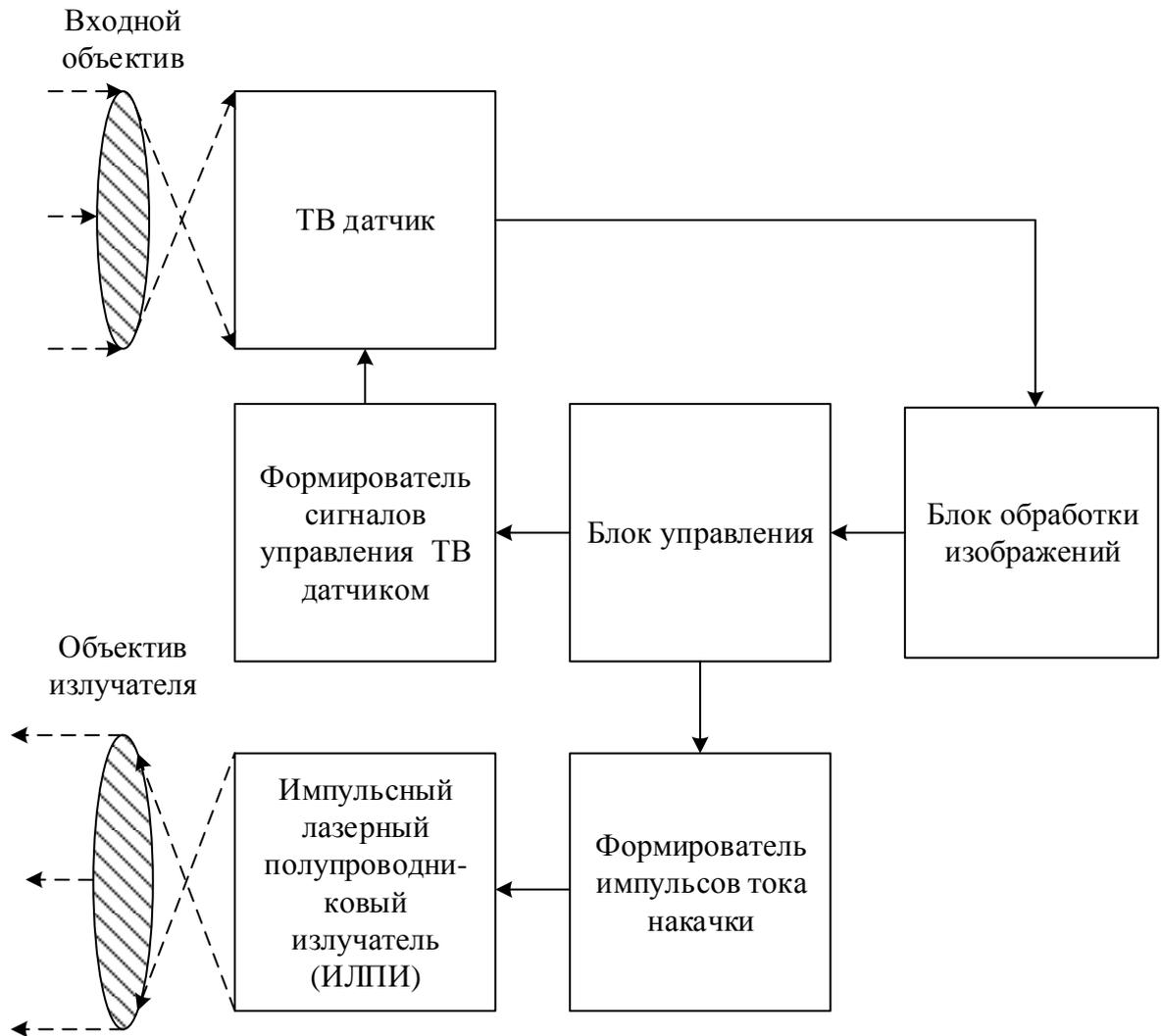


Рисунок 1.11 – Структурная схема АИ ТИС без ЭОП

К наиболее успешным создателям таких систем в России можно отнести научный коллектив Новосибирского филиала Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники».

Коллективу из Новосибирска удалось разработать эффективные методы реализации активно-импульсного способа видения на основе ПЗС матрицы [49].

В работах [50–52] подробно рассматривается способ реализации принципа активно-импульсного видения на основе ПЗС-матрицы со строчным переносом в качестве быстродействующего оптического затвора и одновременно преобразователя полученных изображений в видеосигнал.

Реализация активно-импульсного (АИ) метода наблюдения достигается благодаря использованию двухсекционной структуры ПЗС-матрицы, а также за счет разработанного способа управления переносом накопленных в пикселях зарядов. Предложенный авторами способ управления ПЗС-матрицей представлен на рисунке 1.12.

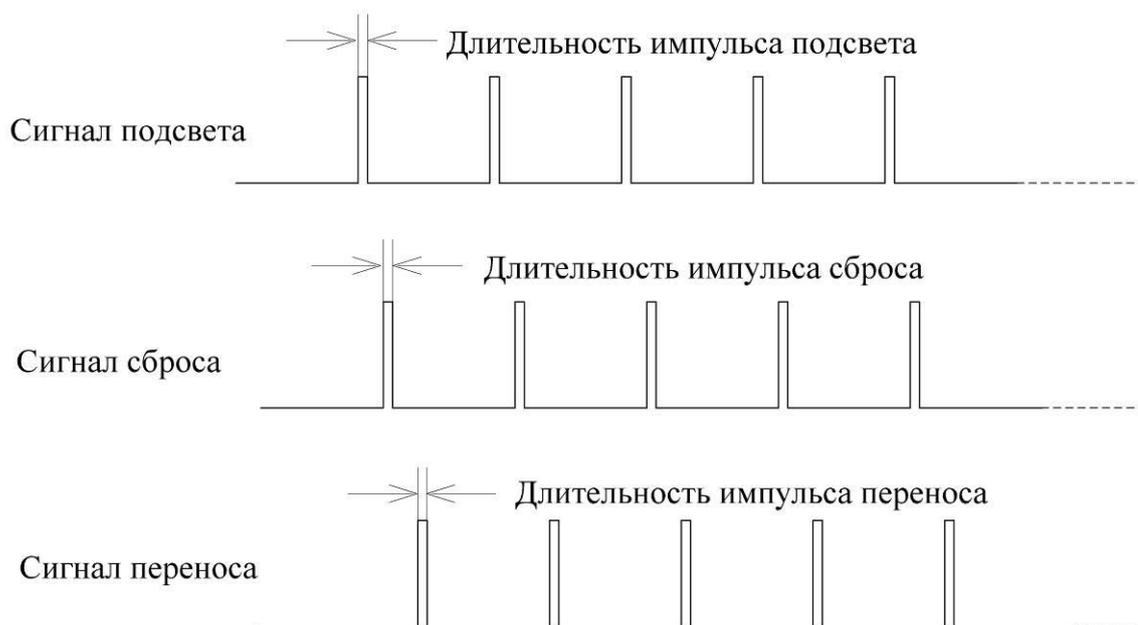


Рисунок 1.12 – Сигналы управления ПЗС-матрицей для работы в АИ режиме

Суть предложенного способа управления ПЗС-матрицей заключается в том, что после каждого излучения ИПП на подложку матрицы подается сигнал для сброса зарядовых пакетов пикселей. Сброс будет длиться до тех пор, пока на матрицу не поступит оптический сигнал, отраженный от объекта интереса наблюдаемой сцены, после чего сброс отключается и в пикселях матрицы происходит накопление заряда пропорционально интенсивности наблюдаемого отраженного от объекта интереса излучения. После экспонирования на матрицу подается сигнал переноса всех зарядовых пакетов во вторую затемненную секцию матрицы и таким образом происходит сохранение зарядовых пакетов, соответствующих изображению наблюдаемого пространства. После определенного количества таких циклов управления в обычном для матрицы режиме начинается считывание записанного изображения сцены и соответственно формирование выходного видеосигнала. Задержка стробирования в такой системе определяется моментом времени окончания сброса зарядов пикселей в подложку.

Длительность стробирования соответствует времени после окончания сигнала сброса и до момента поступления сигнала переноса зарядового пакета во вторую секцию матрицы.

Авторами на основе предложенного ими метода управления ПЗС-матрицей удалось создать АИ ТИС, предназначенную для поиска оптических и оптико-электронных средств по бликам их оптических устройств, ведущих встречное наблюдение [53].

В разработанном авторами приборе используется в качестве стробируемого фотоприемника ПЗС-матрица ICX445 производства Sony размером  $1280 \times 960$  элементов с прогрессивной разверткой и строчным переносом.

Источник подсвета состоит из двух включающихся поочередно импульсных полупроводниковых двухэлементных диодных лазеров QPGAS2S09H (Perkin Elmer) с длиной волны 905 нм и мощностью в импульсе равной 200 Вт. Частота следования импульсов 10–15 кГц, а их длительность 100–150 нс. Каждый лазер снабжен отдельным объективом, формирующим его собственное поле зрения с угловой расходимостью светового пучка  $9 \times 3^\circ$  для дистанции до 300 м и  $4 \times 2^\circ$  для дистанции свыше 300 м. Оценка дальности до наблюдаемых бликов данным прибором производится с невысокой точностью и определяется согласно выражению (1.2), используя известное значение задержки стробирования при которой яркость наблюдаемого блика максимальна.



Рисунок 1.13 – АИ ТИС на базе стробируемой ПЗС-матрицы

За рубежом также активно ведутся работы по созданию портативных АИ ТИС без использования ЭОП. Так еще в 2014 году известная фирма во Франции

*LHERITIER*, представила малогабаритную стробируемую камеру *CAT EYE* для круглосуточного наблюдения. Камера работает в активно-импульсном режиме и не использует ЭОП, в свою очередь в качестве стробируемого фотоприемника применяется *sCMOS (Scientific CMOS)* матрица. Такая матрица имеет быстродействующий глобальный затвор с разрешением 1920x1080 элементов. Предполагаемое расстояние распознавания человеческого лица ночью составляет до 150 м, а глубина наблюдаемого пространства составляет около 15 м [54].

Компания *BrightWayVision (BWV)* из Израиля разработала АИ ТИС для помощи водителю в управлении транспортным средством в сложных условиях видения на дороге. Данная разработка так же не использует ЭОП. При этом в роли стробируемого фотоприемника применяется *Automotive Gated CMOS (AGCMOS)* матрица, работающая в диапазоне времен экспозиций от 30 нс до 500 нс.

Устройство подсвета в данной камере реализовано на базе ИК ИЛПИ с пиковой мощностью в 500 Вт и работающий на длине волны 808 нм. Данная АИ ТИС используется в автоматическом режиме сканирования пространства по глубине, и благодаря чему имеет возможность оценки расстояния до объектов наблюдения. Изображение наблюдаемого пространства выводится на дисплей, который установлен в салоне автомобиля [55].

### **1.5 Времяпролетные камеры**

Времяпролетная камера (англ. *Time-of-Flight, ToF*) представляют собой оптико-электронную систему из специальной ToF-матрицы и ИК устройства подсвета. Времяпролетная камера предназначена для построения «карт глубин» наблюдаемого пространства. Построение «карт глубин» основано на измерении времени пролета отраженного от объектов сцены оптического излучения подсвета до каждого пикселя *ToF*-матрицы. По своему принципу работы времяпролетную камеру можно отнести к АИ ТИС и некоторые алгоритмы измерения дальности, используемые во времяпролетных камерах можно применить и в разрабатываемых АИ ТИС. На выходе времяпролетная камера способна формировать, как двумерное изображение с распределением интенсивности наблюдаемого пространства (как

обычная камера), так и двумерное изображение «карт глубин», где амплитудное значение пиксела соответствует расстоянию до данной точки пространства.

Времяпролетная камера может использоваться в различных областях – как научных, так и бытовых, включая промышленную автоматизацию, логистику, робототехнику, медицину и биологические науки, а также в различных направлениях «интеллектуального управления производством». К примеру, впервые смартфон был оснащен *ToF*-камерой в 2017 г. В нем такая камера является основным элементом системы *FaceID*, сканирующей лицо пользователя. Её разрешающая способность составляет 0,03 мегапикселя. Этого вполне достаточно, чтобы запечатлеть уникальный рельеф лица [56].

К основным технологиям измерения дальности времяпролетными камерами можно отнести технологии *PMD* (*Photonic Mixer Device*), *Range gated imagers* и *Direct Time-of-Flight*.

В технологии *PMD* источник подсвета в ИК диапазоне формирует непрерывный модулированный сигнал с частотой модуляции  $f_{mod}$ , а излучение отражается от объектов сцены и измеряется каждым пикселем матрицы камеры.

Далее специальная схема оценивает уровни корреляции и вычисляет фазовый сдвиг  $\varphi$  между излученным и принятым сигналами, который пропорционален дальности  $D$  до объекта:

$$D = \frac{\varphi \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot f_{mod}}. \quad (1.5)$$

Сигнал с каждого пикселя матрицы обрабатывается независимо. В результате формируется изображение, являющееся трехмерной визуализацией поверхности наблюдаемых объектов. Данное изображение состоит из количества элементов равном количеству пикселей матрицы. Элементы данного изображения содержат оценки дальности до соответствующих участков поверхности (в метрах). Из формулы (1.5) следует, что максимальная измеряемая дальность, когда фазовый сдвиг  $\varphi$  максимален, равна отношению скорости света к удвоенной частоте модуляции. При наличии в поле зрения камеры объектов, расстояние до которых больше, чем верхняя граница диапазона измерения, будет возникать методическая

погрешность, кратная максимальной измеряемой дальности. Также в данной реализации метод измерения чувствителен к наличию постоянной составляющей в принимаемом модулированном сигнале, так как она оказывает влияние на фазовый сдвиг  $\varphi$ . Для устранения влияния постоянной составляющей используют модернизированную схему приема сигнала в которой для вычисления фазы используются одновременно четыре пикселя со сдвинутыми относительно друг друга на 90 градусов фазами опорного колебания [57, 58].

В технологии «*Range gated imagers*» используется импульсный метод согласно которому источник подсвета в ИК диапазоне освещает сцену короткими импульсами длительностью  $\tau_l$  при этом выборка отраженной энергии производится в два этапа с разной задержкой стробирования относительно каждого ИПП. Причем разница во времени стробирования в двух этапах равна длительности сигнала подсвета  $\tau_l$ . Длительность каждой выборки также равна  $\tau_l$ . На рисунке 1.14 приведена упрощенная схема аналогового пикселя матрицы *ToF*-камеры для импульсного метода измерения.

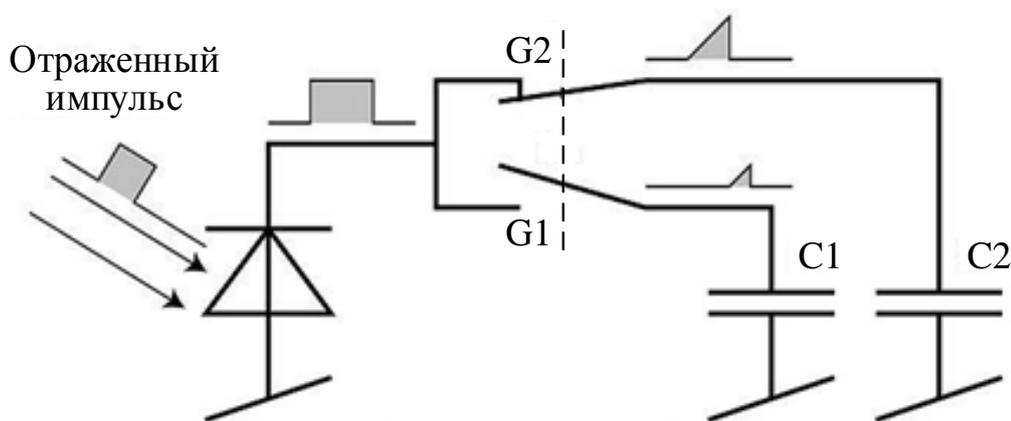


Рисунок 1.14 – Упрощенная схема аналогового пикселя *ToF*-камеры

Во время первого этапа сразу после излучения импульса источником подсвета замыкается ключ  $G1$  при этом ключ  $G2$  разомкнут, весь поступающий световой поток от начала излучения в течении времени длительности подсвета  $\tau_l$  преобразуется в заряд и накапливается в МДП-конденсаторе  $C1$ . Во время второго этапа ключ  $G2$  замыкается спустя время  $\tau_l$  после излучения импульса источником подсвета при этом ключ  $G1$  разомкнут и весь поступающий световой поток от

начала излучения в течении времени длительности подсвета  $\tau_l$  преобразуется в заряд и накапливается в МДП-конденсаторе  $C2$ . В результате по завершению обоих этапов в МДП-конденсаторах  $C1$  и  $C2$  содержится величина заряда  $Q1$  и  $Q2$  пропорциональная длительности принятого отраженного излучения за время  $\tau_l$  на каждом этапе. На рисунке 1.15 представлен принцип реализации импульсного метода.

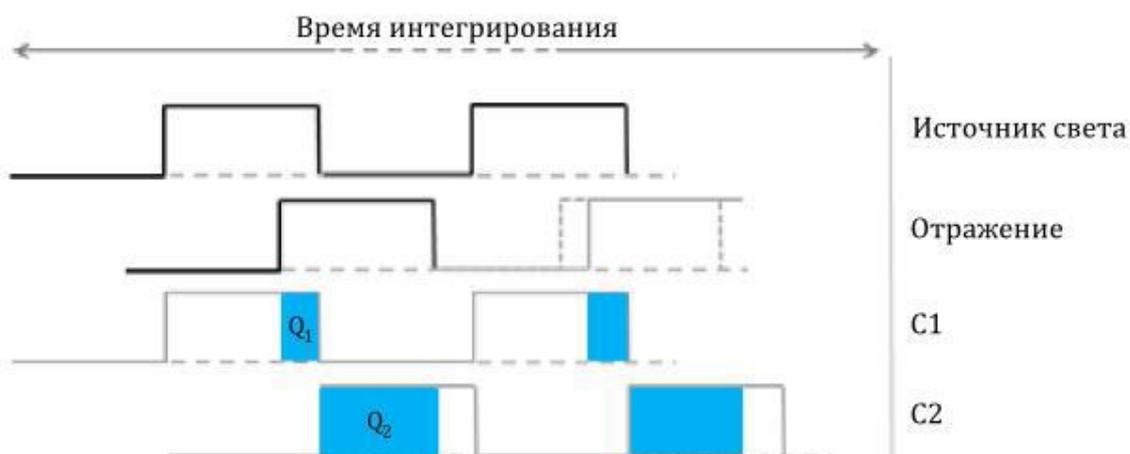


Рисунок 1.15 – Принцип реализации импульсного метода

Далее измеряются электрические заряды  $Q1$  и  $Q2$ , накопленные за время этих выборок, а затем вычисляется расстояние, используя формулу:

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \tau_l \cdot \frac{Q2}{Q1 + Q2}. \quad (1.6)$$

Максимальная глубина измерения дальности и построения «карт глубин» ограничена длительностью подсвета  $\tau_l$  и определяется как:

$$D_{\max} = \frac{\tau_l \cdot c}{2}. \quad (1.7)$$

В цифровых матрицах *ToF*-камер к каждому пикселю подключен цифровой счетчик, работающий на частоте порядка нескольких гигагерц. Счетчик отсчитывает время, в течении которого на пиксель поступал отраженный сигнал подсвета в каждом из двух этапах и таким образом число до которого досчитает счетчик эквивалентно величине заряда в аналоговом варианте матрицы *ToF*-камеры и может быть использовано для расчета дальности [59].

В технологии «*Direct Time-of-Flight*» измерение дальности основано на прямом измерении в каждом пикселе задержки  $\tau_d$  прихода отраженного

оптического ИПП. При этом дальность можно вычислить, используя выражение (1.2). Матрицы *ToF*-камер для данной технологии представляют собой матрицы лавинных фотодиодов на основе *InGaAs* (*APD*) или решетки *PIN* фотодиодов, работающих в диапазоне длин волн от 980 нм до 1600 нм [60].

Среди известных измерительных 3D-технологий наиболее перспективными является использование времяпролетных камер для измерения дальности до наблюдаемых объектов. В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики известных измерительных 3D-технологий: системы стереоскопического зрения, системы со структурированным подсветом пространства, системы с лазерной триангуляцией и времяпролетные камеры [61].

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики измерительных 3D-технологий

Характеристики	Стереоскопическое зрение	Структурированный подсвет	Лазерная триангуляция	Времяпролетные камеры
Расстояние до объекта	Среднее	Среднее	Небольшое	Большое
Погрешность измерения значений дальности	От средней до высокой	Высокая	Минимальная	Средняя
Работа в режиме реального времени	Почти отсутствует	Среднее качество	Почти отсутствует	Высокое качество
Стоимость	Средняя	Высокая	Высокая	От средней до низкой

Несмотря на то, что технологии времяпролетных камер на сегодняшний день достаточно бурно развиваются, но у них как у «измерителей дальности» можно отметить некоторые недостатки, которые заключаются в следующем:

- сложность производства матриц фотоприемников и, как следствие, высокая стоимость камер;
- небольшой диапазон измерения дальности до 0,3–10 м;

- повышенные требования к форме импульса источника подсвета для высокой точности измерения дальности, что накладывает ограничение на его мощность;
- меньшая чувствительность в сравнении с АИ ТИС на базе ЭОП;
- небольшая мощность источника подсвета в совокупности с меньшей чувствительностью делает практически невозможным измерение дальности в сложных условиях видения (туман, дым, снегопад).

### 1.6 Измерение дальности АИ ТИС

Так как АИ ТИС работает по принципу оптического локатора, то эту особенность можно использовать для определения дальности до объектов, находящихся в поле зрения системы, а также построения «карт глубин» наблюдаемого пространства, где каждому пикселю двумерной картины соответствует дальность до объекта, который проецируется на этот пиксель.

Данные функции измерения дальности АИ ТИС могут быть использованы, например, для ориентации в пространстве автономных беспилотных аппаратов, измерении габаритных размеров объектов и их трехмерной визуализации.

Простейшие способы определения дальности до объекта в АИ ТИС имеют невысокую точность измерения. Так при наблюдении объекта, находящегося в АЗВ, которая имеет треугольную форму (рисунок 1.2) используя известное значение текущей задержки стробирования  $\tau_d$  и выражение (1.2) можно оценить дальность до данного объекта. Однако при проведении такого однократного измерения максимальная ошибка может составлять до половины глубины АЗВ  $l_z$  и по разным источникам составляет от  $\pm 5$  метров или более [62–64].

В некоторых исследованиях, посвященных способам повышения точности определения расстояния до объектов наблюдения, практически не учитывается форма АЗВ. В частности, в [1], представлено выражение, использующее разность значения задержки стробирования фотоприёмника и значения длительности стробирования. При этом длительность ИПП не использовалась в расчете. Следует отметить что подобный расчет корректен только при треугольной форме АЗВ (рисунок 1.2). В этом случае предлагаемое выражение определит точку

пространства содержащую начало АЗВ, где объект наблюдения будет наблюдаться с нулевым контрастом. При этом если длительность ИСФ не будет в точности равной длительности ИПП, то таким образом расчетная дальность до объекта наблюдения не будет соответствовать действительности.

Достаточно основательно подошли к вопросу определения расстояния до объектов при помощи АИ ТС в работе [65]. Основной идеей авторов является расчет активной зоны видения и ее характерных точек. Недостатком данного метода является то, что авторы не учитывают форму ИПП и стробирования ЭОП, проводя вычисления исключительно с идеальными формами в виде прямоугольных импульсов.

Стремление к повышению точности измерения дальности АИ ТИС приводит к методам, использующим множество двумерных изображений, получаемых изменением времени задержки ИСФ относительно ИПП. К таким методам можно отнести метод максимального сигнала и метод сканирования по глубине поля зрения (*depth scanning*).

Используя метод максимального сигнала ошибку измерения дальности можно достаточно просто уменьшить даже для протяженных АЗВ при условии их треугольной формы (рисунок 1.2) для этого после обнаружения объекта необходимо изменять задержку стробирования  $\tau_d$  до тех пор когда яркость наблюдаемого объекта станет максимальной, т.е. совместить середину треугольной АЗВ с положением данного объекта по дальности. Найденная таким образом задержка стробирования  $\tau_d$  согласно выражению (1.2) наиболее точно ( $\pm 0,5$  м) укажет на дальность до объекта [66, 67]. Однако данный способ может быть весьма затратным по времени измерения, особенно при малом шаге изменения задержки стробирования. На рисунке 1.16 представлена блок-схема поясняющая вышеописанный метод поиска максимального сигнала.

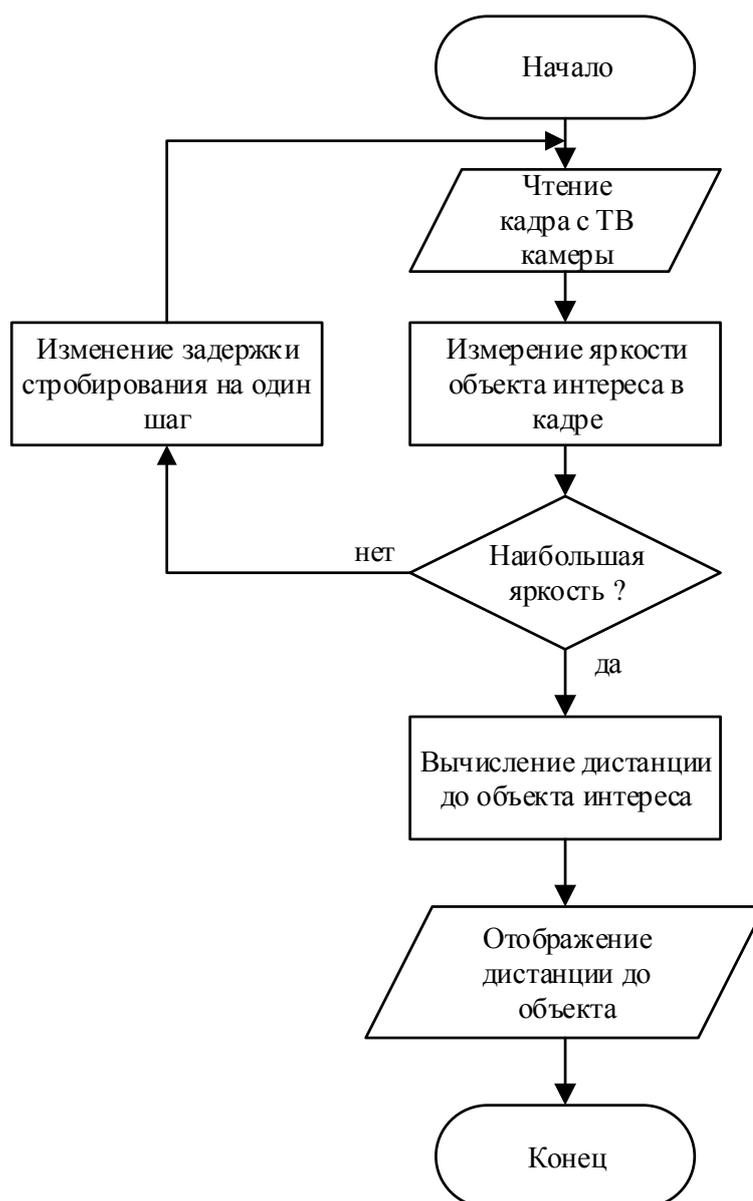


Рисунок 1.16 – Блок-схема алгоритма измерения дальности по методу максимального сигнала

В методе сканирования по глубине поля зрения (depth scanning) используются относительно короткие оптические импульсы подсвета и малые времена стробирования фотоприёмника (0,1–5 нс) [68–70]. Таким образом данный метод использует очень малые по протяженности АЗВ. Алгоритм измерения подобен методу поиска максимального сигнала и главное его отличие состоит в том, что при каждом очередном шаге узкой АЗВ по пространству запоминается уровень яркости объекта  $I_i$  интереса и текущая при этом задержка стробирования  $\tau_i$ . Далее два полученных массива значений яркости и задержек используются для

вычисления между ними средневзвешенного значения (центра масс), полученное средневзвешенное значение является задержкой, соответствующей наибольшей энергии полученной от объекта интереса. Таким образом расстояние до объекта в данном методе можно определить следующим образом:

$$D = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N I_i \cdot \tau_i}{\sum_{i=1}^N I_i}, \quad (1.8)$$

где  $N$  – количество отсчетов;

$I_i$  – яркость объекта;

$\tau_i$  – задержка стробирования.

Данный алгоритм описан в работе [71] с использованием экспериментальной АИ ТИС, состоящей из устройства подсвета на неодимовом лазере с диодной накачкой и рабочей длиной волны 532 нм и пиковой мощностью 8,6 кВт, а также фотоприёмника на базе стробируемого по МКП ЭОП и ПЗС-камеры. Длительность импульса излучения лазера в данной системе составляет 500 пс, а длительность стробирования ЭОП также равна 500 пс. Частота импульсов подсвета и стробирования составляет 32,4 кГц. Частота кадров ПЗС-камеры 50 Гц.

При измерении методом сканирования по глубине поля зрения используется величина шага сканирования равная 10 пс. При этом по утверждению авторов работы данная система способна строить «карту глубин» по дальности с точностью до 0,2 мм и общей протяженностью до 8 м. Необходимое при измерении число шагов сканирования (кадров) зависит от глубины сканирования и может составлять от 50 до 500 кадров.

Метод поиска максимального сигнала и сканирования по глубине поля зрения (*depth scanning*) для измерения дальности использует множество видеок кадров, содержащих одну АЗВ, поэтому такие методы измерения можно назвать однозонными (ОМИД).

Для того чтобы сократить время измерения расстояний и построения «карт глубин» был предложен метод корреляции «расстояние-интенсивность» (*range-*

*intensity correlation*). Принцип измерения расстояния, основан на использовании двух АЗВ, сдвинутых по задержке стробирования на время длительности ИПП. На рисунке 1.17 представлен принцип метода корреляции «расстояние-интенсивность».

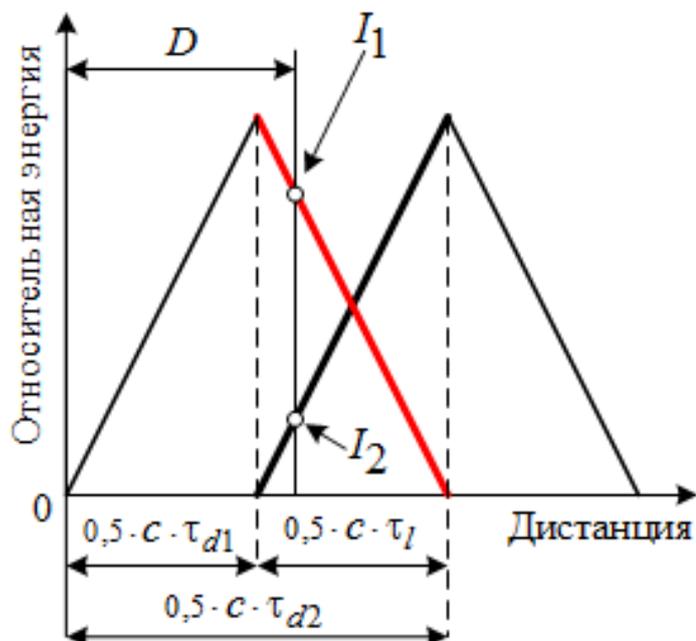


Рисунок 1.17 – Принцип метода корреляции «расстояние-интенсивность»

В виду того, что данный метод использует всего две АЗВ, то его можно назвать двузонным методом измерения дальности (ДМИД). Данный метод имеет аналог в виде рассматриваемого выше импульсного метода, применяющегося во времяпролетных камерах. В настоящее время разработаны два варианта данного метода на основе разных АЗВ. Один вариант метода использует треугольные АЗВ [72], а второй использует АЗВ трапецеидальной формы [73]. Блок-схема алгоритма, реализующего измерение дальности в ДМИД представлена на рисунке 1.18.

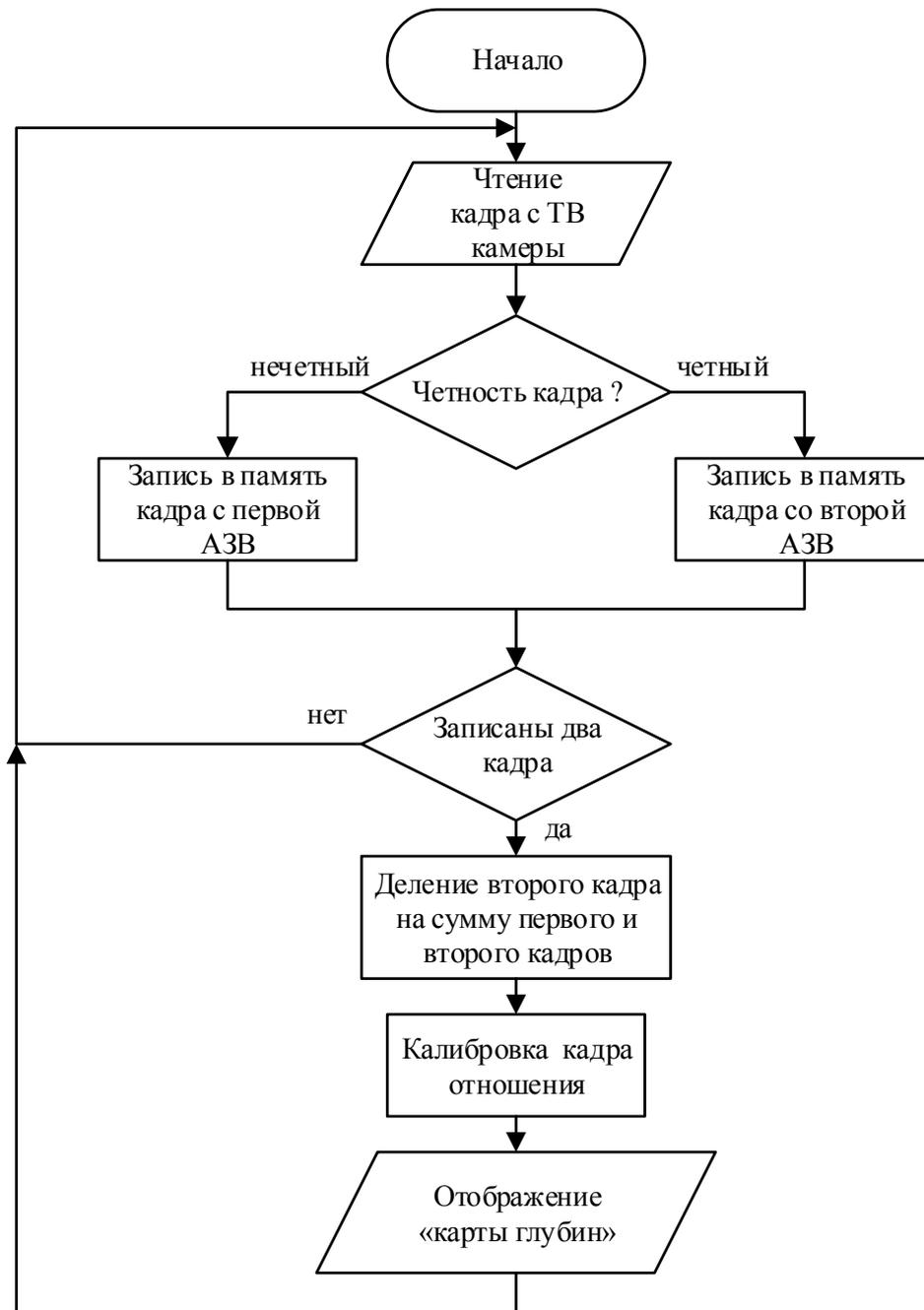


Рисунок 1.18 – Блок-схема алгоритма измерения дальности в ДМИД

Измерение дальности АИ ТИС согласно алгоритму, представленному выше для ДМИД, использующего треугольные АЗВ реализуется следующим образом.

Производится съемка двух последовательных видеок кадров содержащих одинаковые по протяженности, но смещенные относительно друг друга АЗВ. Задержка стробирования для первой АЗВ равна  $\tau_{d1}$ , задержка стробирования для второй АЗВ  $\tau_{d2}$  больше задержки  $\tau_{d1}$  на время длительности ИПП  $\tau_l$ . Таким образом, смещение двух АЗВ относительно друг друга равно длительности ИПП  $\tau_l$ .

Полученные видеокadres содержат значения яркости пикселей  $I_{1,2}$  на изображении объекта интереса, причем первый видеокادر содержит значения пикселей, соответствующих захвату объекта первой АЗВ  $I_1$ , а второй видеокادر содержит значения пикселей, соответствующих захвату объекта второй АЗВ  $I_2$ .

Далее используя полученные значения яркостей объекта в обоих кадрах вычисляется отношение яркости объекта во втором кадре, содержащего вторую АЗВ к сумме двух полученных видеокadres. Также используя значения задержек стробирования для первой АЗВ и длительность ИПП расстояние может быть вычислено согласно следующему выражению:

$$D = \frac{c}{2} \cdot \left( \tau_l \cdot \frac{I_2}{I_2 + I_1} + \tau_{d1} \right). \quad (1.9)$$

При делении непосредственно видеокadres в результате вычислений будет получен видеокادر, где значения яркости пикселей наблюдаемых объектов численно равны расстоянию до этих объектов. Таким образом, полученный в ходе вычислений видеокادر будет содержать «карту глубин» наблюдаемого АИ ТИС пространства.

В исследовании [74] показано, что алгоритм ДМИД с треугольной АЗВ имеет более высокое разрешение по дальности, чем у алгоритма с трапецидальной формой АЗВ.

В работе [75] выполнен анализ погрешности определения расстояний данным методом в случае произвольной формы ИПП. Показано, что абсолютная ошибка пропорциональна длительности импульса  $\tau_l$ . При этом для получения большого диапазона измерения и соответственно большой протяженности «карты глубин» требуется прямоугольная форма и большая длительность ИПП, что ограничивает разнообразие выбора импульсного лазерного источника и стробируемого фотоприемника.

Для исключения влияния формы ИПП при измерении дальности в ДМИД был предложен метод модуляции усиления фотоприемника.

В этом способе трехмерной визуализации наблюдаемого пространства пространственная информация может быть получена посредством АЗВ с

модулированным усилением фотоприемника и АЗВ с постоянным усилением в фотоприемнике. Изображение, содержащее АЗВ с модуляцией усиления, реализуется путем изменения коэффициента усиления оптического затвора фотоприемника. С момента появления данного метода были разработаны два типа модуляции усиления, включая линейную модуляцию [76] и экспоненциальную модуляцию [77]. По сравнению с линейной модуляцией усиления, экспоненциальная модуляция усиления делает независимым разрешающую способность от глубины диапазона измерения дальности. Для метода модуляции усиления форма ИПП может быть и прямоугольной, но его форма должна быть весьма стабильной. К тому же время стробирования фотоприёмника должно было быть намного больше чем длительность ИПП. Из этого следует, что реализация меняющегося во времени усиления фотоприемника по определенному закону приводит к значительному усложнению конструкции АИ ТИС.

В работе [78] предложен метод измерения дальности АИ ТИС и построения «карты глубин» наблюдаемого пространства используя метод разности смежных кадров *AFD* (*adjacent frame difference*). В методе *AFD* используется трапецеидальная форма АЗВ, при этом как и в методе поиска максимального сигнала происходит периодическое изменение задержки стробирования  $\tau_d$  АЗВ, т.е. происходит ее сдвиг в каждом кадре на новую позицию в пространстве. Во время сдвига АЗВ происходит одновременное вычисление разницы между прошлым и текущим кадром и когда эта разность превысит некоторый заранее установленный порог (пятая часть максимальной интенсивности) система запоминает ее как текущий кадр, так и текущее значение задержки стробирования  $\tau_d$  и производит расчет дальности для текущего кадра по формуле (1.2). Далее из полученных видеок кадров и рассчитанных для них дальностей строится «карта глубин». Авторами данной работы был изготовлен макет АИ ТИС на базе ЭОП и апробирован предложенный ими метод *AFD*. Шаг по задержке стробирования для АЗВ составлял 4 нс. В результате испытаний данный метод показал разрешение по дальности 0,6 м на просматриваемой дистанции в 30 м. В методе *AFD* для

построения «карты глубин» требуется множество кадров, а значит и значительное время на ее построение.

### **1.7 Выводы по главе 1**

В данной главе проведен аналитический обзор литературы, описана предметная область, принцип работы и особенности построения АИ ТИС. Рассмотрены структуры систем с использованием ЭОП и без него, приведены примеры таких систем. Рассмотрены известные методы и алгоритмы определения дальности и построения «карт глубин» в АИ ТИС. Результаты, представленные в следующих работах автора [6, 25, 26, 96, 98, 101], были использованы для формулирования и обоснования задач исследования.

На основании вышесказанного сформулирована цель диссертационной работы: разработка методов и алгоритмов прецизионного измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработать прецизионный метод определения дальности в АИ ТИС с широким диапазоном определения расстояний до наблюдаемых объектов, обладающего робастностью к формам управляющих импульсов и неустойчивости их временных параметров.

2. Провести моделирование известных, а также разработанных методов измерения дальности в АИ ТИС с учетом неидеальности форм управляющих импульсов и неустойчивости их временных параметров.

3. Провести экспериментальные исследования разработанного метода измерения дальности на макете АИ ТИС.

4. Разработать метод дополнительного повышения точности измерения с использованием коррекции нелинейности измерительной функции.

5. Провести экспериментальные исследования разработанного метода дополнительного повышения точности измерения за счет коррекции измерительной функции.

## **2 Многозонный метод измерения дальности**

### **2.1 Описание метода и алгоритма многозонного измерения дальности**

В первой главе диссертации представлен обзор известных методов измерения дальности в АИ ТИС и сформулированы задачи, подлежащие исследованию. Рассмотренные методы имеют некоторые недостатки, ограничивающие их применение на практике в реальных условиях эксплуатации АИ ТИС. Так для измерения дальности методом поиска максимального сигнала и методом сканирования по глубине поля зрения требуется большое количество видеок кадров, что делает данные методы непригодными для измерения дальности при движении объектов интереса относительно АИ ТИС. Двухзонный метод измерения дальности (ДМИД), использующий для измерения два видеок кадра в свою очередь для приемлемого диапазона измерения требует большую длительность ИПП, что в свою очередь накладывает ограничения по мощности на оптический излучатель. Также существенным недостатком ДМИД является зависимость точности измерения от формы оптического импульса, что также сокращает номенклатуру используемых излучателей в устройстве подсвета пространства. В методе, использующем модуляцию усиления фотоприемника к недостатку можно отнести сложность реализации линейного закона изменения коэффициента передачи фотоприемника.

В ходе диссертационного исследования для АИ ТИС был разработан свободный от вышеперечисленных недостатков многозонный метод измерения дальности (ММИД) [79, 80]. Разработанный метод измерения дальности позволяет в широких пределах регулировать динамический диапазон определения расстояний до объектов без изменения длительности ИПП. ММИД основан на использовании двух видеок кадров, полученных в АИ ТИС. Данные видеок кадры содержат множества АЗВ, сформированных определенным образом. Таким образом, основой разработанного метода определения дальности является операции над двумя изображениями наблюдаемой сцены, где каждое из двух изображений формируется из множества АЗВ по определенному алгоритму.

Результатом применения ММИД в АИ ТИС является получение результирующего нормированного изображения, в котором значения яркости пикселей соответствуют дистанции до наблюдаемых объектов.

ММИД реализуется в АИ ТИС следующим образом. Системой формируются два последовательных видеокadra. Первый видеокادر содержит определенное количество протяженных (на желаемый диапазон измерения дальности) АЗВ с некоторой постоянной начальной задержкой стробирования, причем протяженная АЗВ формируется за счет ИСФ большой длительности и ИПП малой длительности (рисунок 1.3).

Значение яркости пикселя  $I_1$  с координатами  $(x, y)$  в первом видеокadre можно представить в следующем виде:

$$I_1(x, y) = I(x, y, \tau_{d_0}) \cdot N, \quad (2.1)$$

где  $I(x, y, \tau_{d_0})$  – яркость пикселя с координатами  $(x, y)$  в АЗВ с задержкой стробирования  $\tau_{d_0}$ ;

$N$  – количество АЗВ в видеокadre.

Таким образом согласно (2.1) яркость пикселя на изображении объекта интереса в первом видеокadre определяется  $N$  локальными АЗВ с одинаковой задержкой стробирования равной начальной  $\tau_{d_0}$ .

Второй видеокادر формируется из определенного количества смещенных относительно друг друга АЗВ с уменьшающейся протяженностью, что достигается дискретным изменением величин задержки и длительности ИСФ за время одного кадра.

Значение яркости пикселя  $I_2$  с координатами  $(x, y)$  во втором видеокadre можно представить в следующем виде:

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \cdot \sum_{m=1}^M I \left[ (x, y, (\tau_{d_0} + (m-1) \cdot \Delta\tau_d)) \right], \quad (2.2)$$

где  $M$  – количество различных задержек стробирования;

$\Delta\tau_d$  – шаг временной задержки стробирования.

Согласно (2.2) яркость пикселя на изображении объекта интереса во втором видеокadre определяется  $N$  АЗВ распределенным по  $M$  группам. В первой группе с начальной задержкой  $\tau_{d0}$  и в каждой последующей группе задержка стробирования увеличивается равномерно на шаг  $\Delta\tau_d$ . При этом количество АЗВ с одинаковой задержкой стробирования внутри каждой группы равно  $N/M$ .

Частным является случай, когда количество групп равно максимальному количеству АЗВ формируемых за один кадр. В таком случае каждая последующая АЗВ будет иметь индивидуальную задержку стробирования, отличающуюся на шаг  $\Delta\tau_d$  от предыдущей АЗВ.

Таким образом, фотоприемник в конце длительности второго кадра будет содержать сумму некоторого количества равномерно распределенных по дальности и сокращающихся по протяженности АЗВ. Форма, полученной таким образом, суммарной (интегральной) АЗВ будет напоминать форму «прямоугольного треугольника». Линейно нарастающая часть суммарной АЗВ и является измерительным участком, на котором яркость наблюдаемых в кадре объектов находится в прямой зависимости от их расстояния до измерительной системы. На рисунке 2.1 представлен метод формирования суммарной АЗВ (красный график) с сокращением протяженности и сдвигом по дальности каждой последующей локальной зоны.

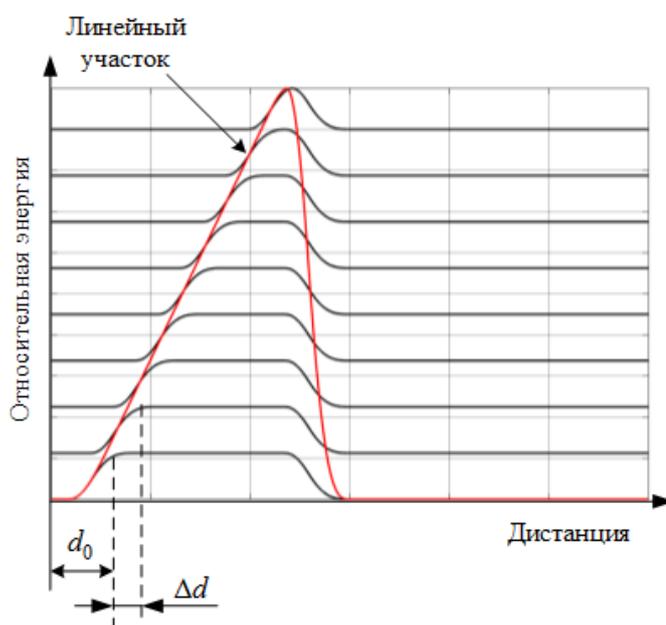


Рисунок 2.1 – Метод формирования суммарной АЗВ

Уменьшение протяженности каждой последующей АЗВ достигается путем сокращения длительности ИСФ синхронно с изменением его задержки. Причем длительность ИСФ сокращается на величину равную шагу по задержке стробирования  $\Delta\tau_d$ .

Для упрощения конструкции блока формирования ИСФ в АИ ТИС в ходе диссертационного исследования был предложен модифицированный метод формирования суммарной АЗВ с линейным участком во втором видеокадре. Основное отличие модифицированного метода формирования суммарной АЗВ от рассмотренного выше способа заключается в том, что второй видеокадр формируется из определенного количества смещенных относительно друг друга локальных АЗВ с постоянной протяженностью равной протяженности АЗВ в первом кадре, что достигается только за счет дискретного изменения величины задержки ИСФ за время одного кадра. При таком способе управления формированием АЗВ за время одного видеокадра будет сформирована суммарная (интегральная) АЗВ с формой, напоминающей равнобедренный треугольника. На рисунке 2.2 представлен модифицированный метод формирования суммарной АЗВ без сокращения протяженности, а только со сдвигом каждой последующей локальной зоны.

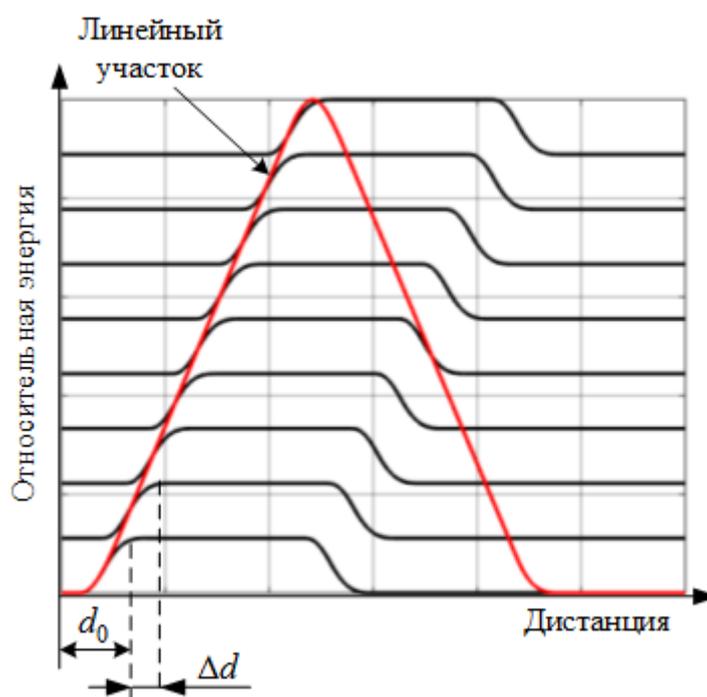


Рисунок 2.2 – Модифицированный метод формирования суммарной АЗВ

Форма суммарной АЗВ, представленная на рисунке 2.2 (красный график) также содержит линейно нарастающий измерительный участок, на котором яркость наблюдаемых в кадре объектов находится в прямой зависимости от их расстояния до измерительной системы. Причем в данном случае таких линейных участков два. Поэтому в измерениях предполагается использование только первого ближайшего к измерительной системе линейного участка суммарной АЗВ. Так как объекты, попадающие на второй дальний линейный участок суммарной АЗВ благодаря закону обратных квадратов, будут наблюдаться со значительно меньшей интенсивностью чем объекты в первой части суммарной АЗВ, которые находятся ближе к измерительной системе.

В реальных условиях сформированные АЗВ будут сильно отличаться от представленных выше, вследствие действия закона обратных квадратов, который приводит к падению уровня энергии в АЗВ пропорционально квадрату расстояния. На рисунке 2.3 показано формирование суммарной АЗВ в реальных условиях с учетом закона обратных квадратов.

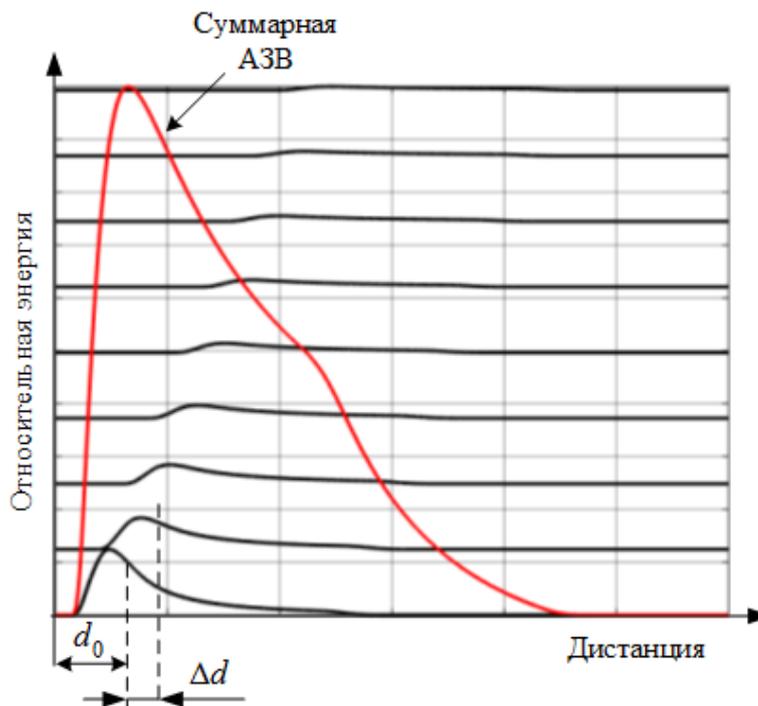


Рисунок 2.3 – Принцип формирования суммарной АЗВ в реальных условиях

Суммарная АЗВ, представленная на рисунке 2.3 (красный график) характеризует реальное распределение энергии по дальности в АИ ТИС.

Для того чтобы в реальных условиях получить линейный измерительный участок зависимости яркости объектов в поле зрения системы от дальности до них (рисунок 2.1, 2.2) необходимо выполнить нормировку суммарной АЗВ.

Нормировка выполняется путем деления значения яркостей пикселей  $I_2$  в видеокадре, содержащем суммарную АЗВ на значение яркостей пикселей  $I_1$  видеокадра с первой АЗВ согласно следующему выражению:

$$I_3(x, y) = \frac{I_2(x, y)}{I_1(x, y)} = \frac{\frac{N}{M} \cdot \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + (m-1) \cdot \Delta\tau_d)]}{I(x, y, \tau_{d_0}) \cdot N}. \quad (2.3)$$

Так как в обоих видеокадрах, содержащих суммарную и первую АЗВ будет действовать закон обратных квадратов, одинаково искажающий их форму, то при использовании выражения (2.3) в результирующем видеокадре будет восстановлена прямопропорциональная зависимость яркости объектов, попадающих в поле зрения системы от расстояния до них. На рисунке 2.4 показаны формы и относительное расположение первой и суммарной АЗВ, а также результат их деления без учета закона обратных квадратов.

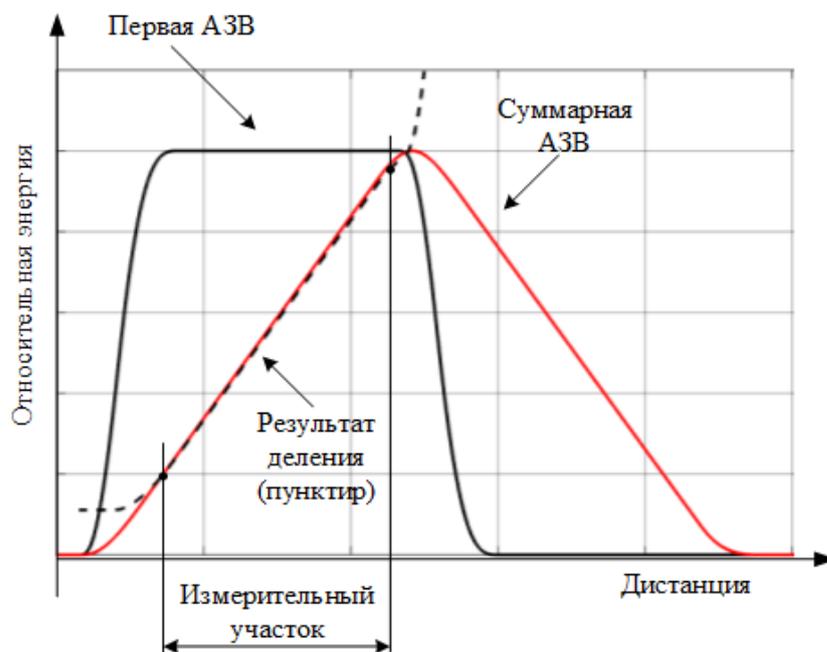


Рисунок 2.4 – Расположение АЗВ и результата их деления в ММИД

На рисунке 2.5 показаны реальные формы и относительное расположение первой и суммарной АЗВ, а также результат их деления с учетом их искажений, вызванных законом обратных квадратов.

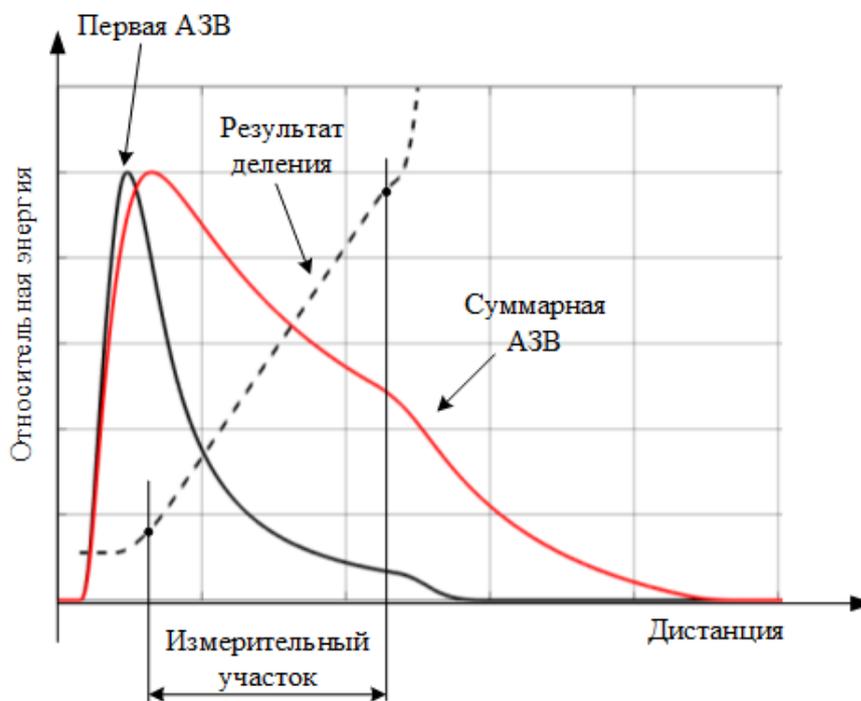


Рисунок 2.5 – Расположение реальных АЗВ и результата их деления в ММИД

Как видно из рисунков 2.4 и 2.5 при нормировке происходит полная компенсация искажений первой и суммарной АЗВ и, как следствие, сохранение линейного участка на полученной кривой их отношения. Так же стоит отметить, что при делении на результирующей кривой их отношения (рисунок 2.4, 2.5) в конце образуется резко нарастающий участок, образованный делением на участок окончания первой АЗВ. В реальной системе при делении двух видеокадров с соответствующими АЗВ данный участок на видеокадре отношения будет представлять собой пиксели в «насыщении», то есть с максимальным уровнем яркости. Начальный и конечный нелинейные участки на кривой отношения в соответствующем видеокадре могут быть легко устранены пороговым методом и, таким образом, может быть выделен линейный измерительный участок, связывающий яркости наблюдаемых объектов с их расстоянием до АИ ТИС. На рисунке 2.6 представлено временное расположение формируемой и результирующей последовательности видеокадров в ММИД.

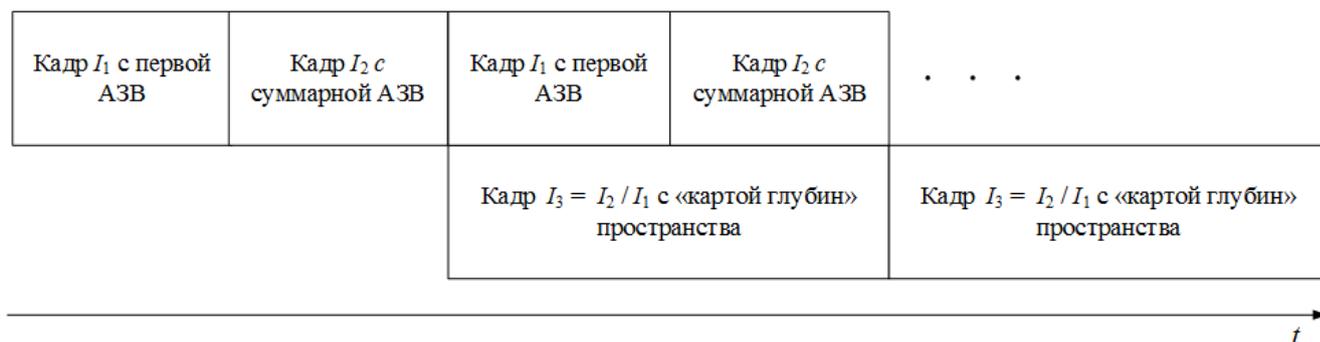


Рисунок 2.6 – Последовательность видеокадров в ММИД

Согласно временному расположению видеокадров в ММИД, представленному на рисунке 2.6, в каждом нечетном кадре формируется первая АЗВ, а в каждом четном кадре суммарная АЗВ. При этом результирующая последовательность видеокадров их отношения, содержащая информацию о дальности до объектов наблюдения будет иметь вдвое меньшую частоту следования.

Формирование АЗВ для ММИД в видеокадрах АИ ТИС можно представить в виде блок-схемы алгоритма, представленном на рисунке 2.7. Согласно данному алгоритму по каждому кадровому синхроимпульсу (КСИ), поступающему с блока управления происходит запуск экспозиции видеодатчика и начинается формирование импульсов управления подсветом следующих с периодом  $T$ . Одновременно с формированием каждого ИПП в зависимости от четности КСИ выбирается и выдерживается задержка формирования ИСФ. Так в каждом нечетном кадре при формировании первой АЗВ для каждого импульса стробирования устанавливается начальная задержка  $\tau_{d0}$  относительно каждого ИПП. В каждом четном кадре синхронно с импульсами подсвета происходит выбор очередной задержки стробирования согласно шагу  $\Delta\tau_d$  и таким образом в каждом четном кадре последовательно формируется смещенные и пересекающиеся в пространстве АЗВ, которые в результате экспонирования за время кадра складываются и образуют форму суммарной АЗВ.

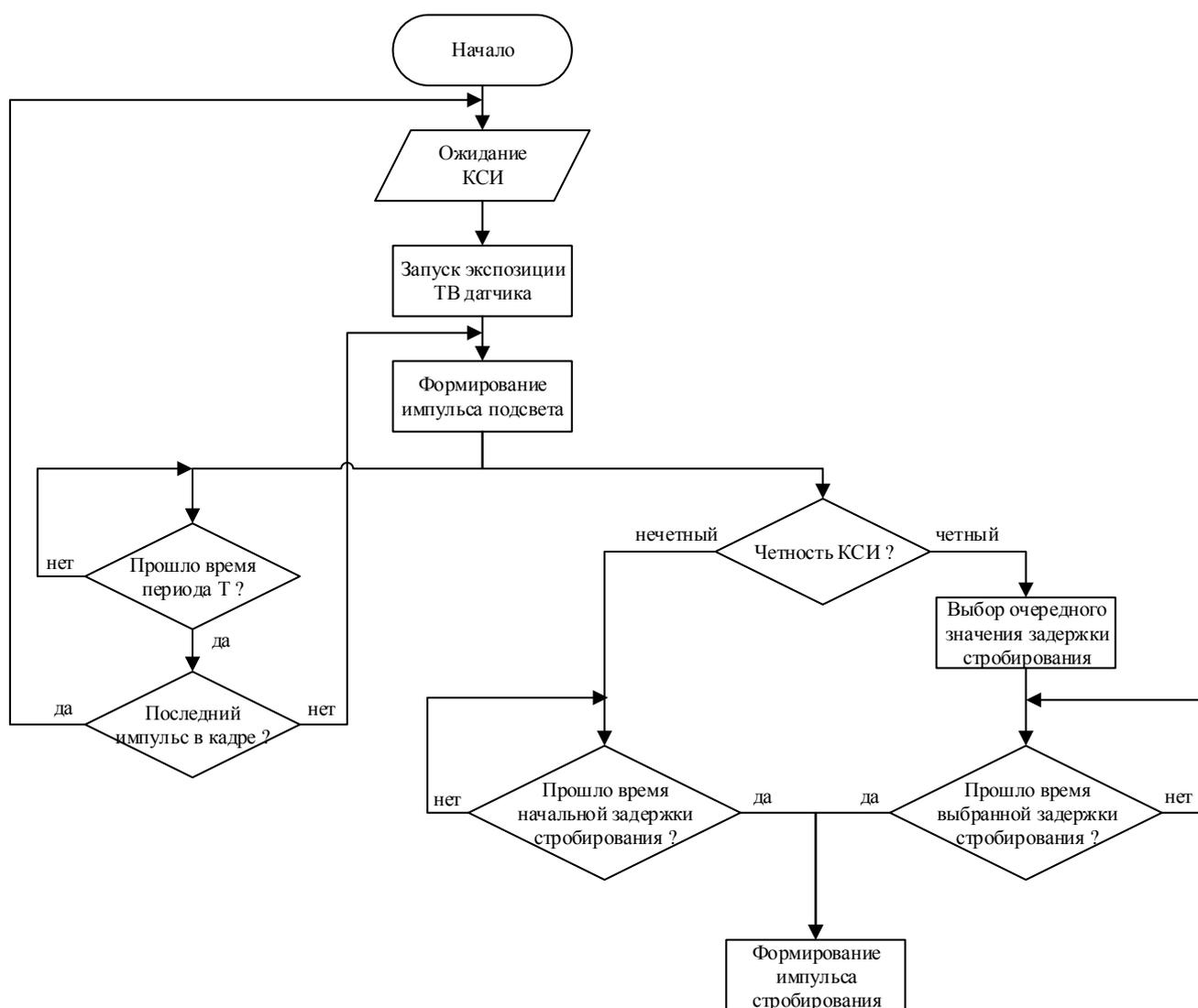


Рисунок 2.7 – Блок-схема алгоритма управления АИ ТИС в ММИД

Далее, имея с выхода видеодатчика АИ ТИС последовательность видеок кадров со сформированными АЗВ, согласно блок-схеме алгоритма, представленному на рисунке 2.7, можно произвести расчет расстояния до наблюдаемых объектов и построить «карту глубин» наблюдаемого пространства. Блок-схема алгоритма, реализующего измерение дальности и построения «карты глубины» в ММИД представлена на рисунке 2.8. Согласно данному алгоритму поступающая видеопоследовательность с видеодатчика АИ ТИС разделяется по четности на два потока, после записи очередной пары кадров происходит деление четного кадра на нечетный и получения таким образом кадра их отношения. Далее используя опорные значения выполняется калибровка полученного кадра их

отношения для соответствия значений яркости пикселей в данном кадре значению расстояния до соответствующего наблюдаемого объекта.

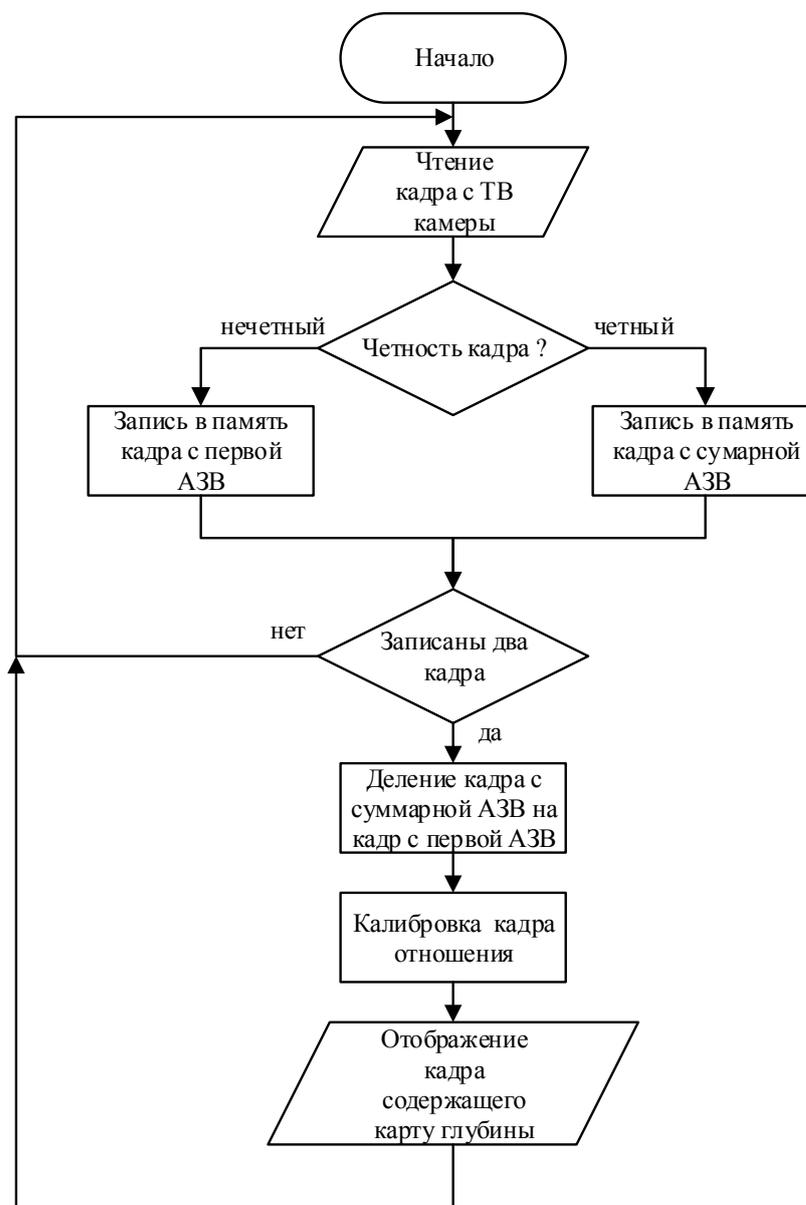


Рисунок 2.8 – Блок-схема алгоритма измерения расстояния в ММИД

Таким образом, полученный в ходе вычислений видеокادر содержит «карту глубин» наблюдаемого АИ ТИС пространства.

## 2.2 Алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции ММИД

В результате влияния инерционности цепей управления фотоприёмником АИ ТИС форма АЗВ может быть искажена, и при этом возникает нелинейность измерительной функции в ММИД, приводящая к систематической ошибке

измерения дальности. На рисунке 2.9 представлена типовая форма АЗВ в АИ ТИС на базе ЭОП со стробированием по фотокатоду.

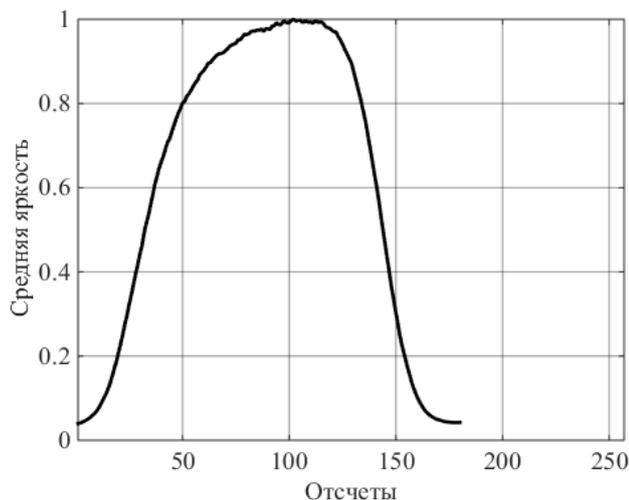


Рисунок 2.9 – Типовая форма АЗВ в АИ ТИС с ЭОП со стробированием по фотокатоду

Форма АЗВ представленная на рисунке 2.9 имеет ярко выраженный «заваленный» передний фронт, что, в свою очередь, скажется на линейности измерительной функции ММИД [81, 82]. Так как измерительная функция в ММИД является частным от деления суммарной АЗВ и одиночной АЗВ, предлагается метод повышения линейности измерительной функции, заключающийся в формировании суммарной АЗВ специальной заданной формы таким образом, чтобы после ее деления на нормирующую АЗВ была получена измерительная функция с высокой степенью линейности. Формирование суммарной АЗВ с заданной формой осуществляется за счет задания индивидуальных задержек стробирования для каждой локальной АЗВ, входящей в суммарную. При этом происходит перераспределение энергии в суммарной АЗВ за счет чего и достигается произвольность ее формы и дальнейшее повышение линейности измерительной функции в ММИД. Формирование суммарной АЗВ в данном случае осуществляется так же из сдвинутых в пространстве и просуммированных за время экспозиций фотоприемника некоторого количества локальных АЗВ. Однако формирование суммарной АЗВ в предлагаемом методе отличается тем, что теперь у каждой локальной АЗВ, входящей в суммарную своя индивидуальная задержка стробирования при ее формировании.

Процесс формирования суммарной АЗВ в данном случае можно представить в виде выражения (2.4), являющегося значением яркости пикселя  $I_2$  с координатами  $(x, y)$  во втором видеокadre,

$$I_2(x, y) = \frac{N}{M} \cdot \sum_{m=1}^M I[x, y, (\tau_{d_0} + \tau_{dm})], \quad (2.4)$$

где  $\tau_{dm}$  – задержка стробирования для локальной АЗВ с номером  $m$ .

Согласно выражению (2.4) и алгоритму, представленному на рисунке 2.7 при формировании очередной локальной АЗВ, входящей в суммарную предполагается выбор из устройства памяти каждый раз некоторого значения задержки стробирования  $\tau_{dm}$ . На данный момент времени неизвестно метода вычисления индивидуальных задержек стробирования для каждой локальной АЗВ, входящей в суммарную зону. Тем не менее каков бы ни был способ расчета индивидуальных задержек  $\tau_{dm}$  первым этапом все же необходимо определить к какому распределению энергии по дальности (форме суммарной АЗВ) во втором видеокadre необходимо прийти, чтобы после операции нормировки (2.3), то есть делении на искаженную первую АЗВ, получить в результате максимально линейную измерительную функцию. На рисунке 2.10 представлена блок-схема алгоритма вычисления требуемой предсказанной формы суммарной АЗВ для коррекции нелинейности измерительной функции ММИД. Предлагаемый алгоритм заключается в предварительном измерении формы АЗВ в АИ ТИС. Из отсчетов измеренной формы АЗВ моделируется суммарная АЗВ путем последовательного сдвига на фиксированный шаг и суммирования отсчетов измеренной АЗВ. Далее производится деление полученной формы суммарной АЗВ на отсчеты измеренной АЗВ и получение таким образом отсчетов модели измерительной функции ММИД. После чего из полученной измерительной функции необходимо выбрать область предполагаемого линейного участка. Далее следует аппроксимировать выбранный участок линейной функцией по методу наименьших квадратов.

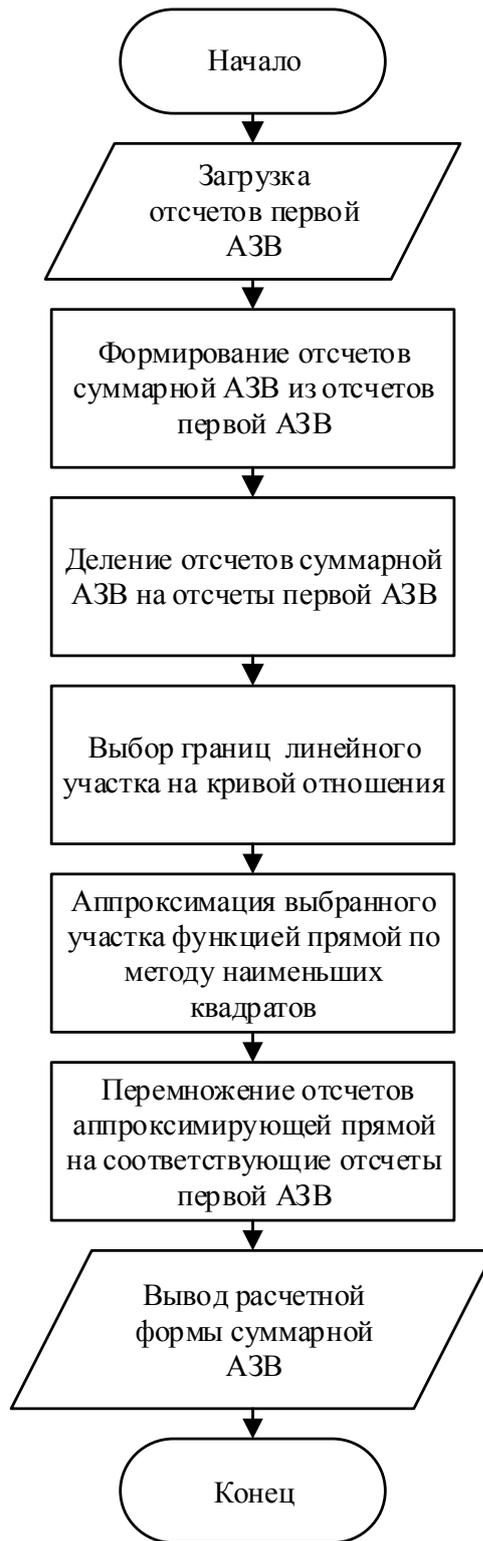


Рисунок 2.10 – Блок-схема алгоритма расчета формы суммарной АЗВ в ММИД с коррекцией

В результате аппроксимации будет получена модель линейной измерительной функции. Для получения необходимой формы суммарной АЗВ необходимо перемножить отсчеты полученной модели линейной измерительной

функции на отсчеты измеренной формы реальной АЗВ АИ ТИС. Полученная в результате перемножения форма суммарной АЗВ и является той предсказанной формой к которой необходимо стремиться при формировании суммарной АЗВ в АИ ТИС.

### **2.3 Выводы по главе 2**

В данной главе был описан разработанный многозонный метод измерения дальности (ММИД), позволяющий производить определение расстояний до наблюдаемых объектов в АИ ТИС используя короткий по длительности оптический ИПП и обладающим таким образом потенциально более широким диапазоном измерения дальности, чем в ДМИД.

В разделе 2.1 описаны два принципа реализации ММИД, отличающихся способом формирования суммарной АЗВ. Приведены аналитические выражения формирования изображения в ММИД, представлены и описаны блок-схемы алгоритмов управления АИ ТИС для ММИД и обработки изображений, получаемых с АИ ТИС для измерения дальности согласно ММИД.

В разделе 2.2 представлен разработанный метод повышения точности измерения дальности ММИД, заключающийся в коррекции нелинейности измерительной функции ММИД, путем предварительного искажения формы суммарной АЗВ. Приведено аналитическое выражение формирования суммарной АЗВ. Представлена блок-схема алгоритма расчета необходимой предсказанной формы суммарной АЗВ для ММИД с коррекцией.

Результаты данной главы представлены в следующих работах автора [79-82, 84].

### 3 Компьютерное моделирование многозонного метода измерения дальности

#### 3.1 Оценка влияния формы оптического импульса подсвета пространства

Как показано в пункте 1.3.2 первой главы данной работы, оптический импульс ИК-излучателя Л-13 являющегося наиболее подходящим для АИ ТИС прибором подсвета пространства имеет резко ассиметричную форму излучения (рисунок 1.9) и данное обстоятельство согласно выражению (1.1) приведет к искажению формы АЗВ формируемой АИ ТИС [83]. Таким образом, необходимо оценить влияние формы оптического ИПП на потенциальную точность измерения дальности ММИД в АИ ТИС. Для проведения сравнительной оценки также будет произведено моделирование двухзонного метода измерения дальности, представленного в пункте 1.6 первой главы [80, 84].

Формирование АЗВ в модели производится в дискретной форме выражения (1.1) при этом отсчеты формы АЗВ  $E_i$  определяются следующим образом:

$$E_i = \frac{1}{i^2} \cdot \sum_{n=1}^N L_n \cdot G_{i-n}, \quad (3.1)$$

где  $L_n$  – отсчеты формы сигнала ИПП;

$G_i$  – отсчеты формы сигнала ИСФ.

Множитель перед знаком суммы в выражении (3.1) позволяет учесть в модели зависимость формы АЗВ от расстояния и при моделировании АЗВ без учета действия закона обратных квадратов будет опущен. В программной модели в качестве временного шага дискретизации выбран шаг модельного времени равный 0,06667 нс, что соответствует шагу по расстоянию равному 0,01 м. При моделировании ДМИД использовались модели ИПП и ИСФ длительностью 100 нс. Моделирование производилось с идеализированной (трапециевидной) формой ИПП с короткими симметричными фронтами и с квазиреальной формой с плавно нарастающим длительным передним фронтом импульса. На рисунке 3.1 представлена форма квазиреального ИПП длительностью 100 нс, являющегося моделью реального оптического импульса ИК-излучателя Л-13.

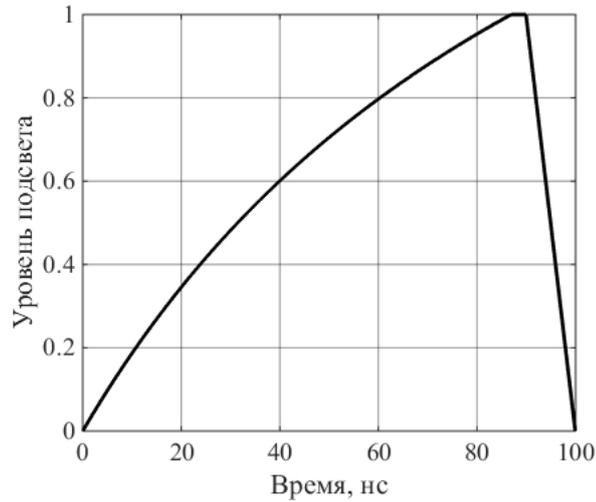


Рисунок 3.1 – Форма квазиреального ИПП

Формирование каждой из двух АЗВ при моделировании ДМИД производилось в соответствии с выражением (3.1). На рисунке 3.2 представлены модели АЗВ для ДМИД при идеализированной форме ИПП. Задержка стробирования для первой АЗВ равна 50 нс, а для второй АЗВ равна 150 нс.

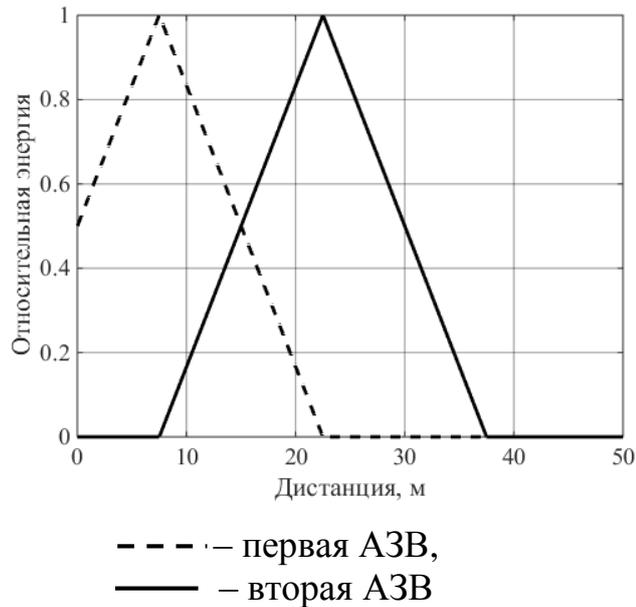


Рисунок 3.2 – Модели АЗВ при идеализированном ИПП

На рисунке 3.3 представлены модели АЗВ для ДМИД при квазиреальной форме ИПП (рисунок 3.1).

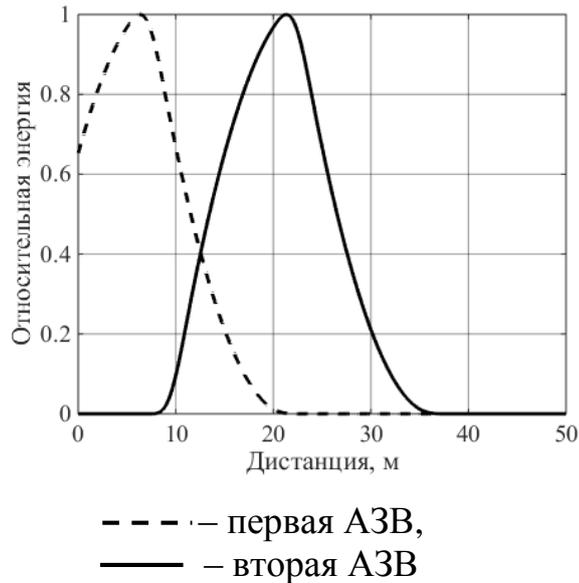


Рисунок 3.3 – Модели АЗВ при квазиреальном ИПП

На рисунке 3.3 отчетливо заметен вклад квазиреальной формы ИПП в формы АЗВ. Влияние в данном случае выражено в асимметрии фронтов, сформированных АЗВ. Отсчеты измерительной функции в ДМИД согласно выражению (1.9) при идеализированной и квазиреальной формы ИПП представлены на рисунке 3.4.

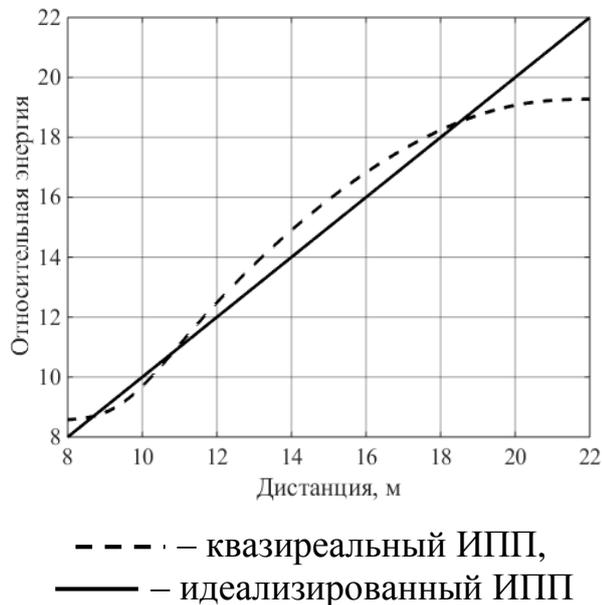


Рисунок 3.4 – Графики измерительных функций в ДМИД

Полученные на рисунке 3.4 измерительные функции согласно выражению (1.9) являются результатом отношения отсчетов заднего фронта первой АЗВ и переднего фронта второй АЗВ для каждого случая. Также кривые их отношения для удобства оценки потенциальной точности метода были пронормированы в единицах расстояния. Оценкой потенциальной точности в

модели будет служить линейность полученных измерительных функций. В данном случае линейность определяется как среднеквадратическое значение разности отсчетов измерительной функции, соответствующей случаю с идеализированной формой ИПП, и измерительной функции, соответствующей случаю с квазиреальной формой ИПП.

На рисунке 3.5 представлен график абсолютной ошибки измерительной функции ДМИД при квазиреальной форме ИПП.

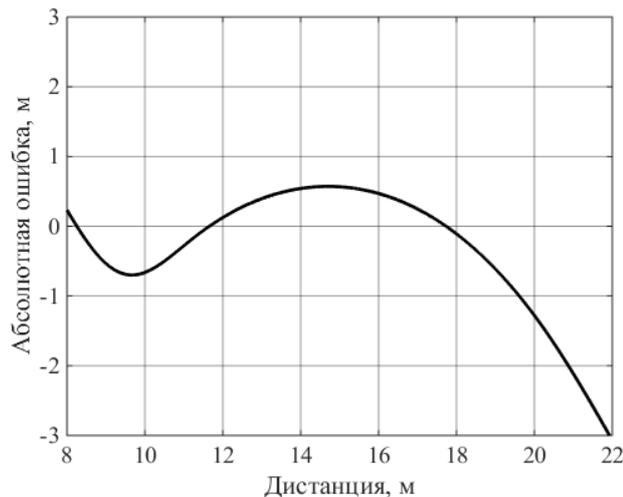


Рисунок 3.5 – График абсолютной ошибки измерительной функции ДМИД

Из графика на рисунке 3.5 видно, что при сложной форме оптического импульса (рисунок 3.1) измерительная функция ДМИД имеет явно выраженную нелинейность. При этом по результатам моделирования среднеквадратическое значение ошибки измерения дальности составляет 0,88 м в диапазоне измерений от 8 м до 22 м. Данное значение среднеквадратической ошибки определяет потенциальную точность ДМИД при заданных в модели параметрах метода и формы ИПП, приближенной к форме реального импульса ИК излучателя Л-13.

Далее представлены результаты моделирования ММИД при идеализированной и квазиреальной форме ИПП аналогично представленному выше моделированию ДМИД.

Для проведения корректного сравнения влияния формы ИПП на оба метода параметры ИПП и ИСФ в ММИД выбирались с учетом границ диапазона измерения дальности и глубины измерительного участка аналогично выбранным в ДМИД. Таким образом моделирование ММИД приводится для диапазона от 8 м до

22 м с глубиной измерительного участка, 14 м. Как следует из ММИД глубина линейной части измерительной функции располагается на пологой вершине первой АЗВ, соответственно для требуемой глубины измерительного участка в 14 м можно задать длительности ИПП и ИСФ согласно выражению (1.4). Длительность ИПП выбирается равной 30 нс, соответственно длительность ИСФ выбирается равной 130 нс, что и обеспечит согласно (1.4) протяженность участка максимальной энергии АЗВ равной 15 м. Далее для наглядности формы моделей АЗВ будут показаны без учета закона обратных квадратов. На рисунке 3.6 представлена модель первой АЗВ в ММИД при идеализированной форме ИПП.

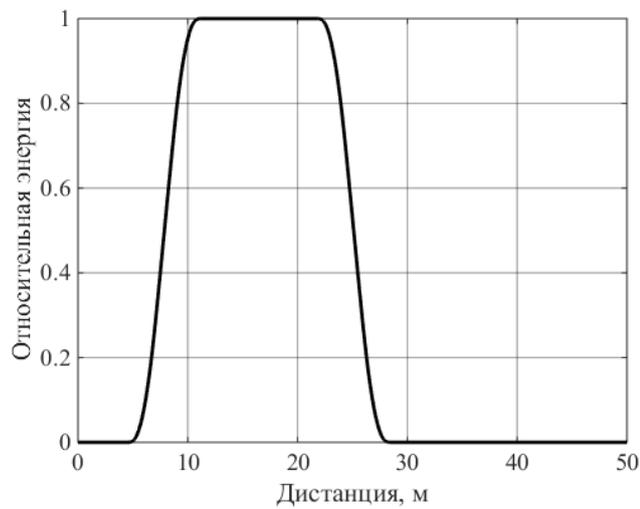


Рисунок 3.6 – Модель первой АЗВ в ММИД

В ММИД необходимо сформировать суммарную АЗВ с нарастающим участком, перекрывающим заданный диапазон в 15 м. В данном случае для формирования суммарной АЗВ выбирается 20 локальных АЗВ, смещенных каждая относительно друг друга на шаг в 5 нс. На рисунке 3.7 представлено относительное расположение 20-ти локальных АЗВ при формировании суммарной АЗВ.

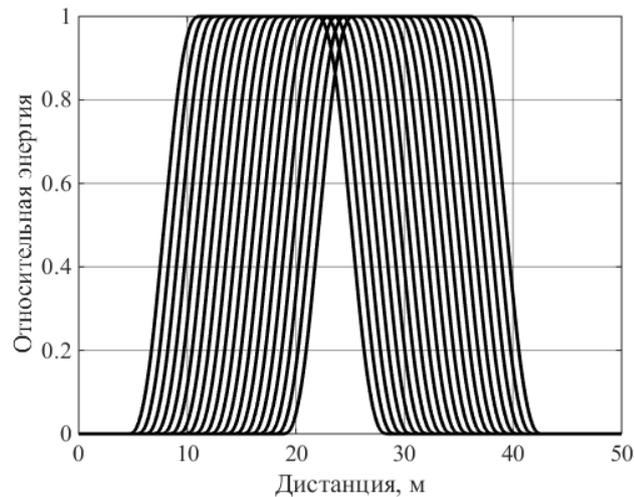


Рисунок 3.7 – Расположение АЗВ в 20-ти зонном ММИД

На рисунке 3.8 представлена модель суммарной АЗВ сформированная из 20-ти локальных АЗВ сдвинутых с шагом 5 нс.

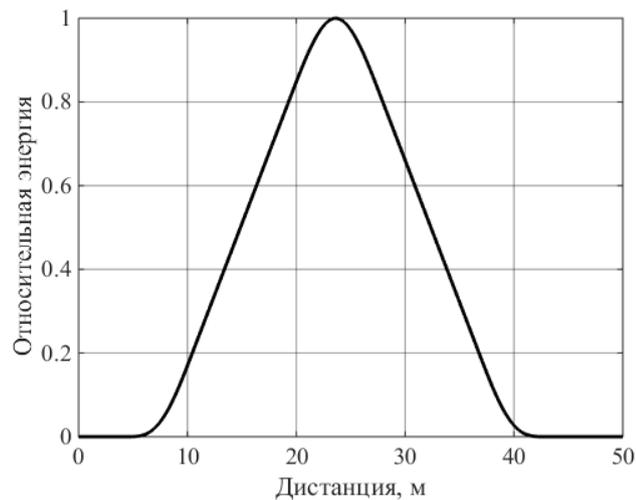


Рисунок 3.8 – Модель суммарной АЗВ в 20-ти зонном ММИД

Далее в соответствии с принципом работы ММИД для получения измерительной функции выполняется деление отсчетов первой половины суммарной АЗВ, изображенной на рисунке 3.8 на отсчеты первой АЗВ, представленной на рисунке 3.6. Модель измерительной функции ММИД в заданном диапазоне расстояний при идеализированной форме ИПП представлена на рисунке 3.9.

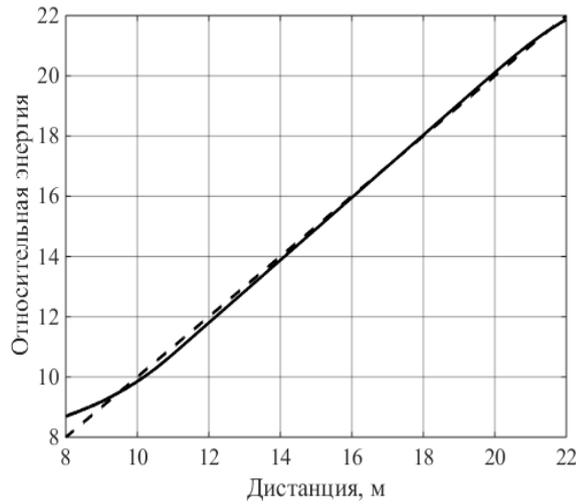


Рисунок 3.9 – Графики измерительной функции модели 20-ти зонного ММИД (сплошная) и ее линейная аппроксимация (пунктирная)

На рисунке 3.9 также представлен результат аппроксимации измерительной функции линейной функцией по методу наименьших квадратов. На рисунке 3.10 представлен график абсолютной ошибки измерительной функции ММИД, полученный как разность отсчетов измерительной функции (рисунок 3.9 – сплошная линия) и отсчетов ее линейной аппроксимирующей функции (рисунок 3.9 – пунктирная линия). График абсолютной ошибки измерительной функции отражает нелинейность измерительной функции на заданном диапазоне измерения дальности, что в свою очередь при заданных параметрах определяет потенциальную точность измерения дальности данным методом. В общем случае нелинейность измерительной функции может быть определена как среднеквадратическое значение ее абсолютной ошибки по всему диапазону измерения дальности. Для случая с идеализированным ИПП среднеквадратическое значение ошибки измерения дальности, составило 0,11 м.

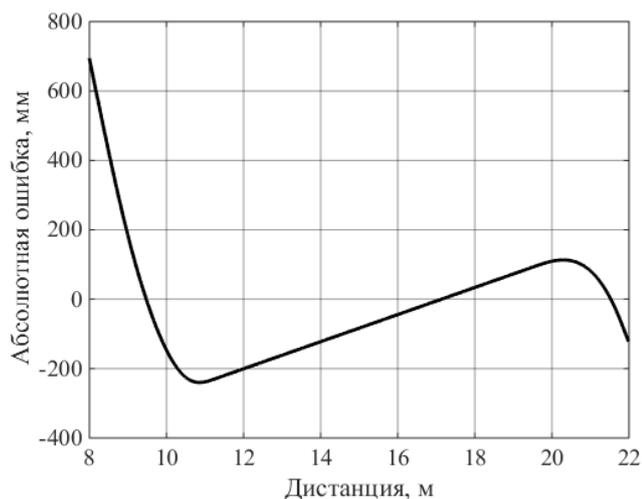


Рисунок 3.10 – График абсолютной ошибки измерительной функции в модели 20-ти зонного ММИД

При моделировании ММИД с квазиреальным импульсом подсвета в качестве последнего использовалась модель формы оптического импульса ИК излучателя Л-13 длительностью 30 нс. На рисунке 3.11 представлены сравнительные графики измерительных функций результата моделирования ММИД для идеализированной (пунктирный график) и квазиреальной (сплошной график) формы ИПП.

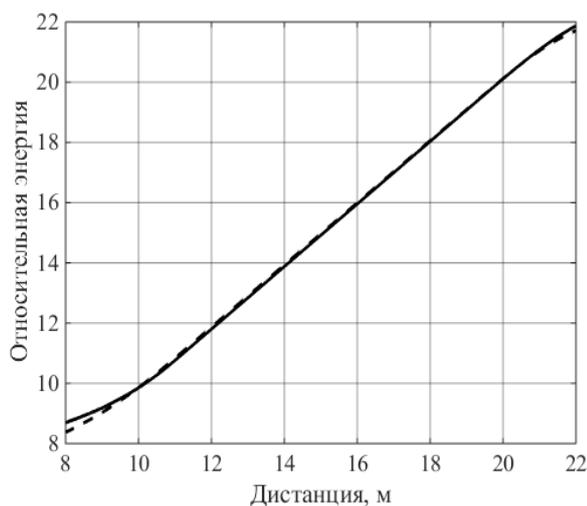


Рисунок 3.11 – Графики измерительных функций модели 20-ти зонного ММИД

На рисунке 3.12 представлены сравнительные графики абсолютных ошибок измерительных функций результата моделирования ММИД для идеализированной (пунктирный график) и квазиреальной (сплошной график) формы ИПП.

Среднеквадратическое значение ошибки измерения дальности для случая с квазиреальным ИПП составило 0,17 м.

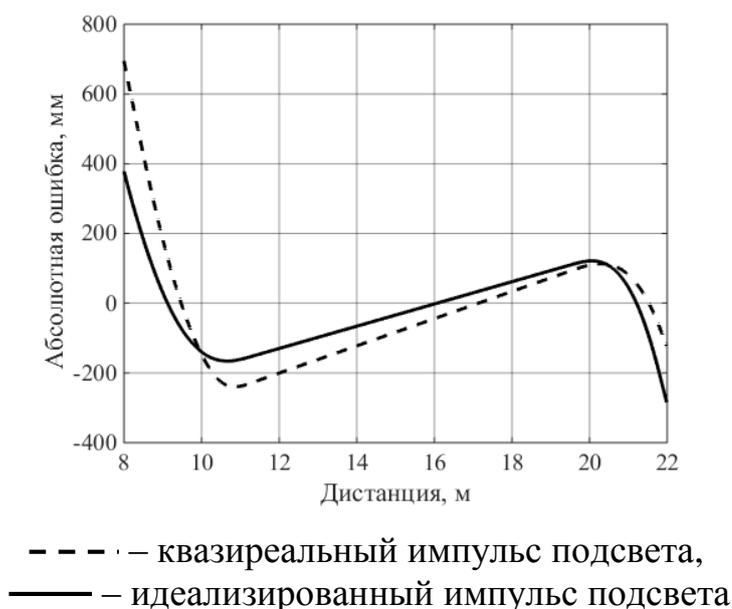


Рисунок 3.12 – Графики абсолютных ошибок измерительных функций модели 20-ти зонного ММИД

Согласно графикам абсолютных ошибок измерительных функций, представленных на рисунке 3.12 можно сделать вывод о том, что форма оптического ИПП практически не влияет на форму измерительной функции. При этом происходит лишь небольшой сдвиг измерительной функции по дальности. В свою очередь на линейный участок измерительной функции форма ИПП не оказывает влияния, а следовательно и на точность измерения дальности в ММИД в отличие от ДМИД, где искажение формы оптического импульса приводит к нарушению линейности измерительной функции ДМИД.

### 3.2 Оценка влияния количества локальных АЗВ на потенциальную точность ММИД

При оценке потенциальной точности измерения дальности в ММИД представляет особый интерес зависимость потенциальной ошибки измерения дальности в ММИД от количества локальных АЗВ. Для оценки влияния количества локальных АЗВ на потенциальную точность в ММИД было произведено моделирование данного метода при различном количестве локальных АЗВ, входящих в суммарную АЗВ [80]. Шаг между локальными АЗВ выбирался исходя из их количества при фиксированной глубине по дальности. При этом были

выбраны следующие параметры: полная длительность квазиреального ИПП составляет 30 нс, длительность импульса стробирования 160 нс, количество локальных АЗВ, входящих в суммарную АЗВ изменялось от 2 до 10. Шаг между отдельными локальными АЗВ, входящих в суммарную АЗВ, определялся как отношение длительности вершины первой АЗВ к количеству локальных АЗВ, составляющих суммарную АЗВ. В качестве результата фиксировались экстремумы кривой абсолютной ошибки, а также среднеквадратического значения ошибки по всему диапазону измерения дальности. Результаты моделирования представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты моделирования зависимости ошибки линейности от количества локальных АЗВ для ММИД

Количество локальных АЗВ	Максимальное значение ошибки, +/- м	Среднеквадратическое значение ошибки, м
2	+3,5 / -2,75	1,67
3	+1,75 / -1,8	1,13
4	+0,9 / -1	0,57
5	+0,5 / -0,55	0,33
6	+0,26 / -0,26	0,16
7	+0,13 / -0,14	0,08
8	+0,08 / -0,08	0,035
9	+0,06 / -0,07	0,015
10	+0,023 / -0,035	0,008

Значения зависимости среднеквадратической ошибки измерения дальности от количества локальных АЗВ в ММИД представлены на рисунке 3.13.

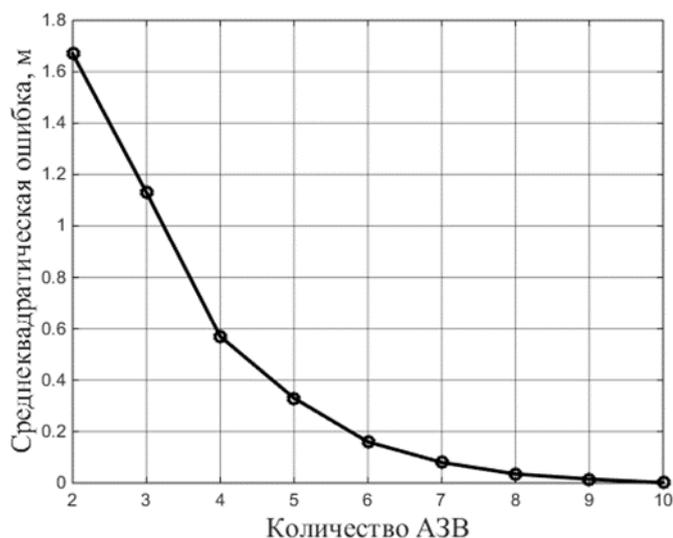


Рисунок 3.13 – График зависимости среднеквадратической ошибки измерения дальности в ММИД от количества локальных АЗВ

Из таблицы 3.1 и рисунка 3.13 видно, что при увеличении количества локальных АЗВ в ММИД потенциальная ошибка определения дальности уменьшается и при количестве локальных АЗВ равном десяти составляет единицы миллиметров. В общем случае главным условием применения ММИД является то, что шаг по задержке стробирования для каждой из локальных АЗВ, входящих в суммарную АЗВ, должен быть много меньше протяженности фронта суммарной АЗВ в пространстве, в противном случае измерительная функция будет иметь колебательный характер.

### 3.3 Оценка влияния шума фотоприемника на потенциальную точность ММИД

В процессе работы АИ ТИС получаемые изображения наблюдаемого пространства подвержены воздействию шума оптико-электронного приёмного тракта системы. К основным источникам шума в оптико-электронном приёмном тракте АИ ТИС можно отнести ЭОП и видеодатчик, считывающий изображение с экрана ЭОП [85, 86]. Таким образом необходимо оценить влияние шума приёмного тракта АИ ТИС на потенциальную точность измерения дальности в ММИД. Для оценки влияния шума приемного тракта АИ ТИС было выполнено моделирование ММИД в котором, при формировании отсчетов локальной и суммарной АЗВ

использовались отсчеты аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). АБГШ представляет собой случайный процесс с гауссовским распределением плотности вероятности, основными параметрами которого является математическое ожидание, характеризующее среднее значение, а также среднеквадратическое отклонение (СКО), характеризующее рассеяние значений относительно среднего [87].

При моделировании влияния АБГШ на потенциальную точность измерения дальности в ММИД к каждому отсчету нормирующей и суммарной АЗВ было добавлено случайное значение АБГШ с нулевым математическим ожиданием и заданным значением дисперсии –  $\sigma^2$ . Моделирование проводилось для 20-ти зонного ММИД при длительности начальной задержки стробирования равной 50 нс. При этом, длительность ИПП была равна 30 нс, импульса стробирования ЭОП 130 нс. Шаг по задержке стробирования в суммарной АЗВ составлял 5 нс. Моделирование было выполнено с учетом закона обратных квадратов для дальностей от 8 м до 22 м.

На рисунке 3.14 представлен график измерительной функции 20-ти зонного ММИД при АБГШ с  $\sigma = 1$ .

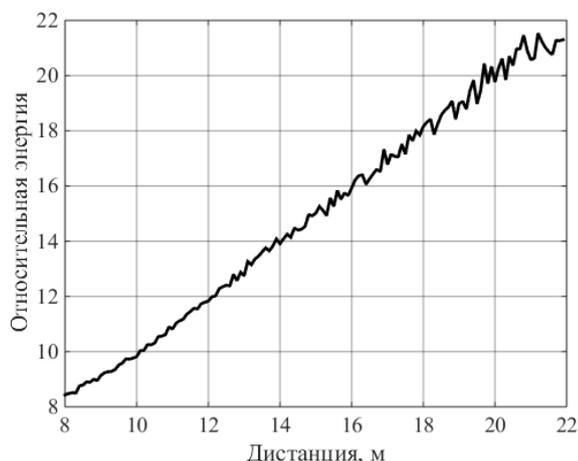


Рисунок 3.14 – График измерительной функции модели 20-ти зонного ММИД ( $\sigma = 1$ )

На рисунке 3.15 представлен график абсолютной ошибки измерительной функции 20-ти зонного ММИД при АБГШ с  $\sigma = 1$ .

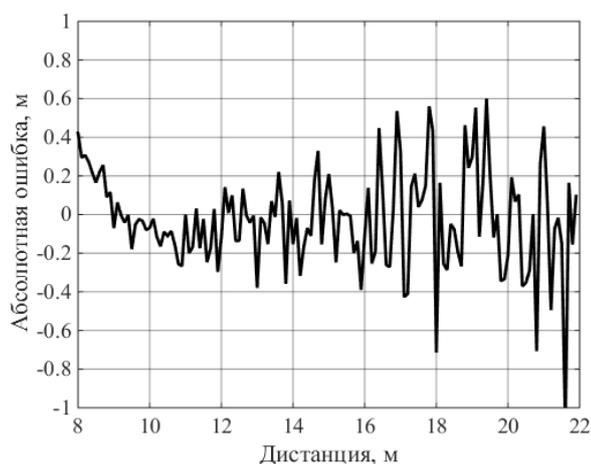


Рисунок 3.15 – График абсолютной ошибки измерительной функции модели 20-ти зонного ММИД ( $\sigma = 1$ )

При измерении дальности в АИ ТИС до объекта интереса согласно ММИД производится измерение его яркости в двух видеокадрах, при этом может производиться измерение как яркости одиночного пикселя на изображении объекта интереса, так и средней яркости некоторой области пикселей на изображении объекта. Измерение средней яркости области пикселей на изображении объекта интереса приводит к повышению отношения сигнал/шум за счет уменьшения уровня шума при усреднении значений пикселей в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  равно количеству усредняемых пикселей. Так при усреднении яркости в области, содержащей 100 пикселей уровень шума будет снижен в 10 раз. На рисунке 3.16 представлен график абсолютной ошибки измерительной функции 20-ти зонного ММИД при АБГШ с  $\sigma = 0,1$ .

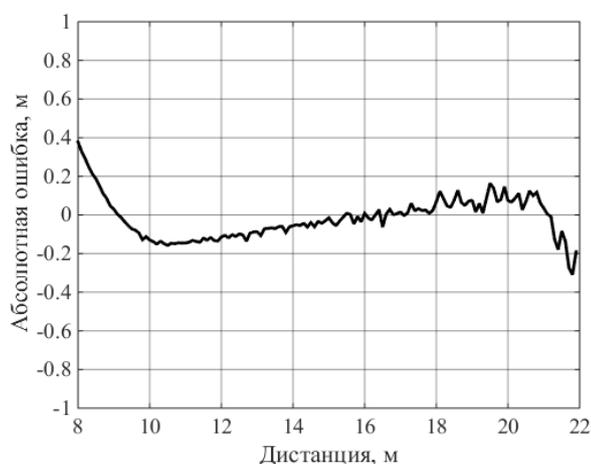


Рисунок 3.16 – График абсолютной ошибки измерительной функции модели 20-ти зонного ММИД ( $\sigma = 0,1$ )

Для численной оценки влияния АБГШ на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД было произведено 50 итераций моделирования для значения  $\sigma = 1$ . Произведена статистическая обработка 50-ти зависимостей абсолютных ошибок измерения от дальности путем вычисления СКО ошибки по дальности с шагом 1 м в диапазоне от 8 м до 22 м.

На рисунке 3.17 представлен график зависимости среднеквадратической ошибки измерения дальности в 20-ти зонном ММИД от дальности при АБГШ с  $\sigma = 1$ .

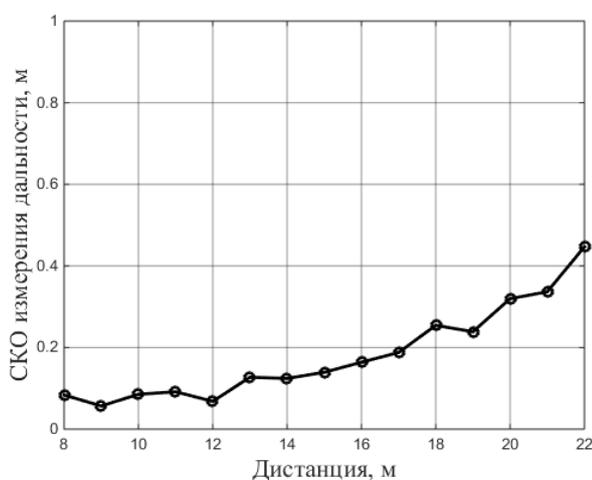


Рисунок 3.17 – График зависимости СКО измерительной функции по дальности для модели 20-ти зонного ММИД ( $\sigma = 1$ )

Из рисунка 3.17 следует, что при стационарном уровне шума фотоприемника потенциальная точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД уменьшается с увеличением дальности. Данный результат объясняется уменьшением яркости объектов наблюдения с увеличением дальности, что в свою очередь приводит к уменьшению отношения сигнал/шум на выходе фотоприемника.

### 3.4 Оценка влияния «джиттера» импульсов подсвета и стробирования на потенциальную точность ММИД

В АИ ТИС получение изображения наблюдаемого пространства осуществляется за счет формирования и управления параметрами коротких по длительности ИПП и ИСФ. В связи с этим на изображения, получаемые с АИ ТИС будут оказывать влияние временные нестабильности формируемых импульсов, то

есть «джиттер» длительностей ИПП и ИСФ, а также «джиттер» задержки ИСФ [88, 89]. «Джиттер» длительности и задержки импульсов управления вызван нестабильностью частоты опорного генератора, а также нестабильностью задержек сигналов в цифровых схемах и цепях формирователей выходных сильноточных и высоковольтных ИПП и ИСФ в АИ ТИС.

При измерении дальности в АИ ТИС, (используя ММИД) на точность определения расстояний до объектов может оказывать влияние начальная задержка ИСФ при формировании первой и суммарной АЗВ в соответствующих видеокадрах, а также длительность ИПП и ИСФ. «Джиттер» начальной задержки ИСФ приведет к случайному сдвигу результирующей измерительной функции в пространстве относительно объектов измерения. При этом ошибка измерения будет пропорциональна величине ошибки начальной задержки стробирования.

При моделировании влияния «джиттера» длительности ИПП на потенциальную точность измерения дальности в ММИД к длительности ИПП прибавлялась положительная или отрицательная величина поправки длительности из равновероятного ряда, ограниченного введённым в модели значением «джиттера». Моделирование проводилось для 20-ти зонного ММИД при длительности начальной задержки стробирования равной 50 нс. При этом, исходная длительность ИПП была равна 30 нс, а длительность импульса стробирования ЭОП 130 нс. Шаг по задержке стробирования в суммарной АЗВ составлял 5 нс. Моделирование было выполнено с учетом закона обратных квадратов для дальностей от 8 м до 22 м.

На рисунке 3.18 представлен график измерительной функции 20-ти зонного ММИД при «джиттере» длительности ИПП равным 1 нс.

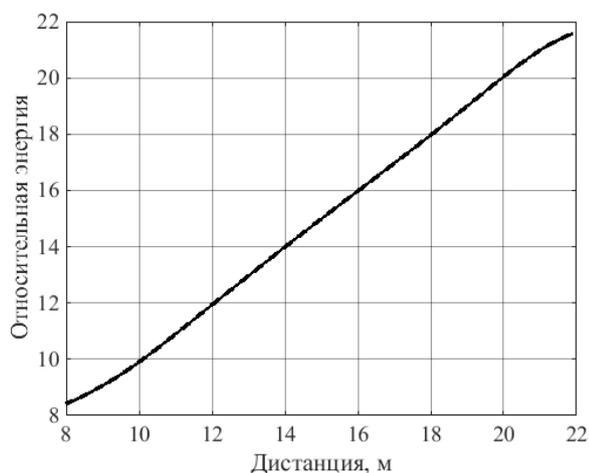


Рисунок 3.18 – График измерительной функции модели 20-ти зонного ММИД («джиттер»-1 нс)

На рисунке представлен график абсолютной ошибки измерительной функции 20-ти зонного ММИД при «джиттере» длительности ИПП равном 1 нс.

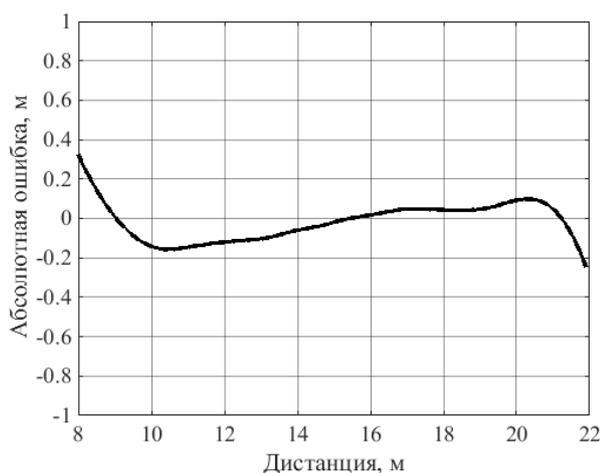


Рисунок 3.19 – График абсолютной ошибки измерительной функции модели 20-ти зонного ММИД («джиттер»-1 нс)

Для численной оценки влияния «джиттера» ИПП на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД было произведено 50 итераций моделирования для значения «джиттера» длительности ИПП от 0,5 нс до 5 нс. Для каждого значения «джиттера» произведена статистическая обработка 50-ти зависимостей абсолютных ошибок измерения от дальности путем вычисления СКО ошибки по дальности с шагом 1 м в диапазоне от 8 м до 22 м. На рисунке 3.20 представлены графики кривых зависимости СКО измерения дальности для

результатов 50-ти итераций моделирования 20-ти зонного ММИД при изменении «джиттера» длительности ИПП от 0 нс до 5 нс с шагом 0,5 нс.

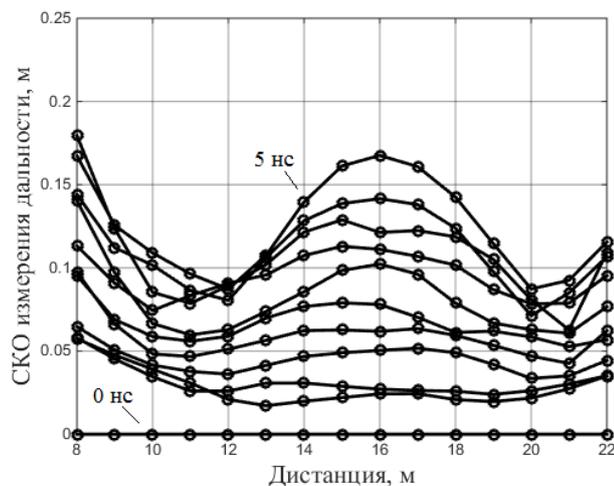


Рисунок 3.20 – Графики зависимости СКО измерения дальности для результатов 50-ти итераций моделирования («джиттер» от 0 нс до 5 нс)

Для представления оценки влияния «джиттера» длительности ИПП в более наглядной форме значения СКО на каждой кривой из рисунка 3.20 были усреднены по дальности и их средние значения в зависимости от величины «джиттера» представлены на рисунке 3.21.

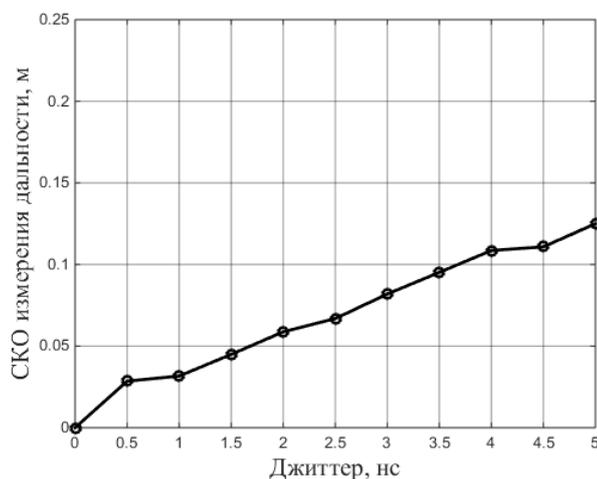


Рисунок 3.21 – График зависимости среднего значения СКО измерения дальности от величины «джиттера» длительности ИПП

«Джиттер» длительности импульса стробирования фотоприёмника по результатам моделирования не приводил к каким-либо изменениям результирующей измерительной функции ММИД.

По результатам моделирования влияния нестабильности длительности ИПП на потенциальную точность измерения дальности в 20-зонном ММИД можно сделать вывод о слабой зависимости точности измерения дальности от расстояния (рисунок 3.20) при значениях нестабильности длительности ИПП, имеющих в реальной аппаратуре (от 0,1 нс до 1 нс). Из рисунка 3.21 наблюдается увеличение ошибки измерения дальности с ростом величины нестабильности длительности ИПП, однако для значений нестабильностей, имеющих в реальной аппаратуре (от 50 пс до 100 пс), среднее квадратическое значение ошибки измерения дальности в диапазоне от 8 м до 22 м составило единицы сантиметров.

### 3.5 Программное обеспечение для моделирования процессов в АИ ТИС

В ходе диссертационного исследования было разработано программное обеспечение ПО для математического моделирования процессов формирования АЗВ в АИ ТИС и методов измерения дальности в таких системах [90].

Разработанное ПО состоит из двух модулей. Первый модуль программы производит вычисление формы АЗВ при различных параметрах ИПП и стробирования фотоприемника, а также с учетом среды распространения оптического сигнала. По результатам моделирования данный модуль выводит форму рассчитанной АЗВ и значения основных ее пространственных характеристик [91].

На рисунке 3.22 представлено окно модуля расчета формы АЗВ.

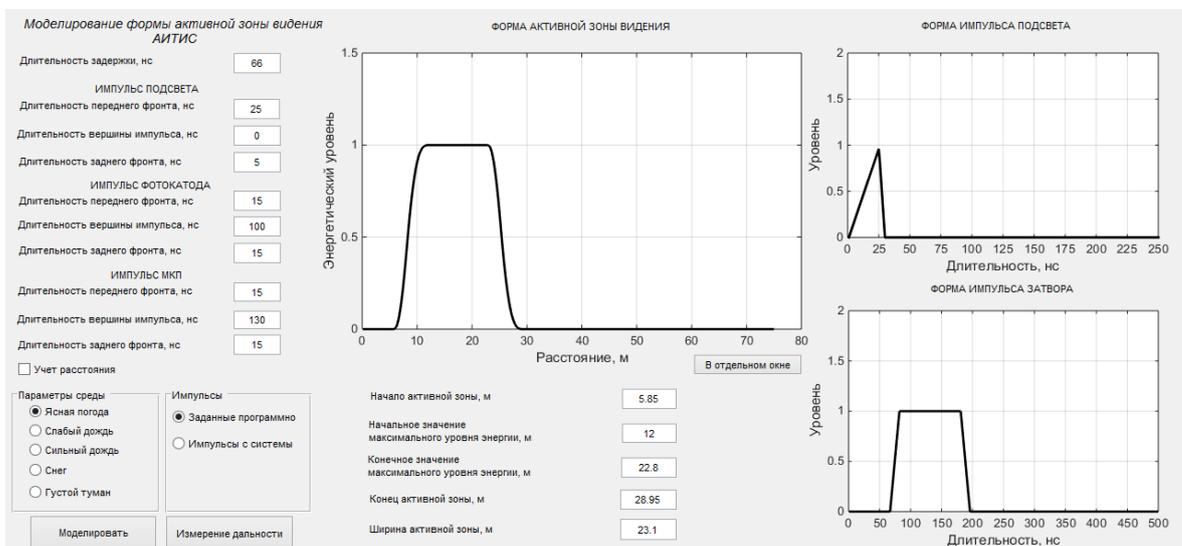


Рисунок 3.22 – Окно модуля вычисления формы АЗВ

Второй модуль разработанного ПО производит оценку потенциальной точности измерения дальности в АИ ТИС методами ДМИД и ММИД.

Моделирование методов измерения дальности производится на основе формы АЗВ рассчитанной в первом модуле программы.

На рисунке 3.23 представлено окно модуля для моделирования методов измерения дальности в АИ ТИС [92, 93].

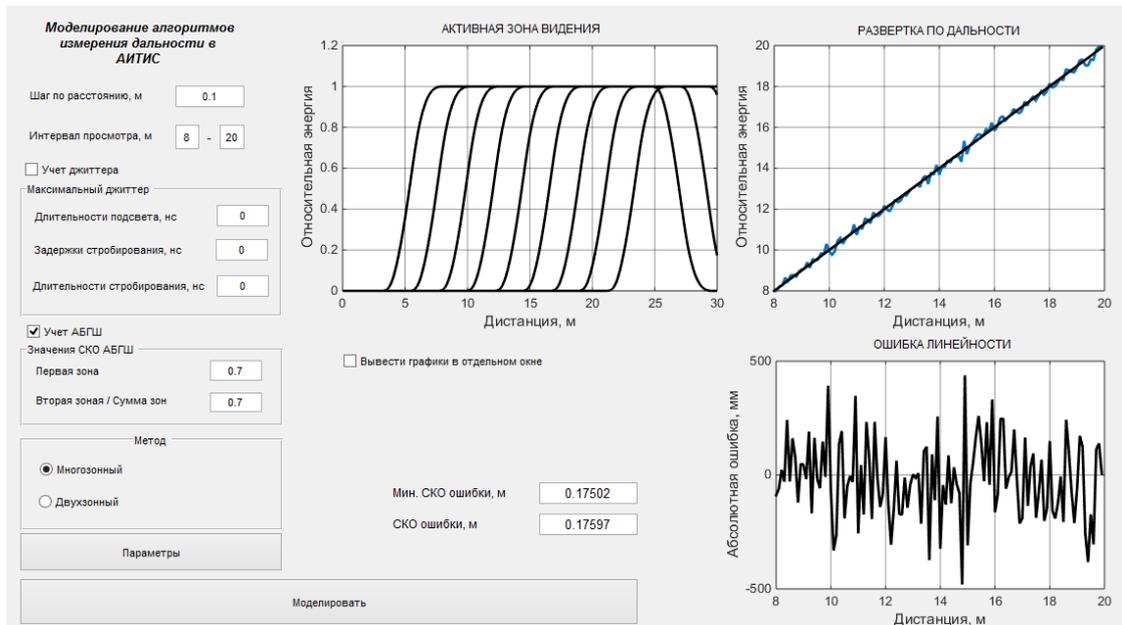


Рисунок 3.23 – Окно модуля моделирования методов измерения дальности в АИ ТИС

В результате расчета модуль программы выводит оценку потенциальной точности моделируемого метода. Входными параметрами модуля являются параметры задержек двух АЗВ в ДМИД. Для ММИД устанавливается начальная задержка стробирования, шаг по задержке стробирования и количество локальных АЗВ. Также данный модуль позволяет учесть при моделировании нестабильность временных параметров импульса стробирования и подсвета в виде их «джиттера», а также влияние шума фотоприемника на формы результирующих АЗВ в виде установки параметра СКО АБГШ с нулевым средним.

### 3.6 Выводы по главе 3

В данной главе приведены результаты моделирования двухзонного и многозонного методов измерения дальности. Проведена оценка потенциальной

точности методов измерения дальности АИ ТИС. Моделирование ДМИД и ММИД проводилось для форм АЗВ, соответствующих свертке как идеализированной, так и квазиреальной формы ИПП с идеализированной формой ИСФ. В результате были получены графики ошибок линейности измерительной функции по дальности, выраженные в виде разности полученной измерительной функции и ее аппроксимирующей по методу наименьших квадратов линейной функции. Моделирование ММИД проводилось для 20-ти сдвинутых в пространстве и перекрывающихся локальных АЗВ с фиксированной протяженностью 24 м при квазиреальной и идеализированной форме ИПП. При этом шаг увеличения задержки стробирования для каждой последующей зоны составлял 5 нс.

В результате моделирования ММИД была также получена измерительная функция. Рассмотрено изменение зависимости максимального и среднеквадратического значения ошибки линейности при изменении количества локальных зон от 2 до 10. По результатам моделирования оценки влияния формы оптического ИПП на потенциальную точность определения дальности методами ДМИД и ММИД получены результаты свидетельствующие об отсутствии влияния формы оптического ИПП на линейный участок измерительной функции ММИД и в тоже время наличия сильного влияния на линейность измерительной функции для ДМИД. При этом для ММИД влияние формы заключается лишь в небольшом сдвиге измерительной функции по дальности, что в свою очередь может быть учтено при ее калибровке.

Представлены результаты моделирования влияния шума фотоприемника на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД. Полученные результаты показали увеличение ошибки измерения с увеличением дальности при стационарном шуме фотоприемника АИ ТИС.

Представлены результаты моделирования влияния «джиттера» длительности ИПП на потенциальную точность измерения дальности в 20-ти зонном ММИД. Полученные результаты показали неравномерную зависимость ошибки измерения с увеличением дальности при неизменном значении «джиттера» и увеличение

ошибки измерения дальности с ростом величины «джиттера» длительности ИПП в АИ ТИС.

Результаты данной главы представлены в следующих работах автора [84, 91, 93]. Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ «Вычислитель активных зон видения томографических систем» № 2021610608 (Приложение А) [90].

## 4 Экспериментальное исследование ММИД в АИ ТИС

### 4.1 Экспериментальный макет АИ ТИС

Далее приводятся результаты экспериментального исследования ММИД на основе разработанного на кафедре телевидения и управления ТУСУР экспериментального макета АИ ТИС с реализованным в нем алгоритмом управления согласно рисунку 2.7.

Обработка экспериментальных результатов проводилась при помощи пакета программ математического моделирования [94, 95]. Ниже приведено описание лабораторного макета АИ ТИС [96]. Разработанный макет АИ ТИС построен с использованием ЭОП согласно структурной схеме, приведенной на рисунке 1.10.

В состав системы входят следующие основные устройства:

- фотоприемное устройство;
- устройство подсвета;
- ПК;
- блок сопряжения с ПК (блок управления).

Фотоприемное устройство состоит из входного объектива, ЭОП поколения П+, согласующего объектива, USB-камеры фирмы *XIMEA*, изготовленной на базе монохромного КМОП-сенсора разрешением  $1280 \times 1024$  элементов.

Устройство подсвета состоит из фокусирующего объектива (конденсора).

В качестве ИК излучателя в устройстве подсвета применяется лазерная решетка Л-13, которая имеет импульсную мощность лазерного излучения 320 Вт и длину волны излучения 840–860 нс, угол подсвета  $12^\circ$ , частоту повторения импульсов 5–10 кГц. Для управления формирователями сигнала стробирования ЭОП и импульса тока накачки излучателя был разработан специальный блок управления на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) [97]. Данный блок управления работает от программы с ПК либо в ручном и автоматических режимах формирует импульсы управления фотоприемным устройством и устройством подсвета пространства в макете АИ ТИС. Так же блок

управления формирует сигнал для синхронизации видеокамеры установленной в системе. Структурная схема блока управления представлена на рисунке 4.1.

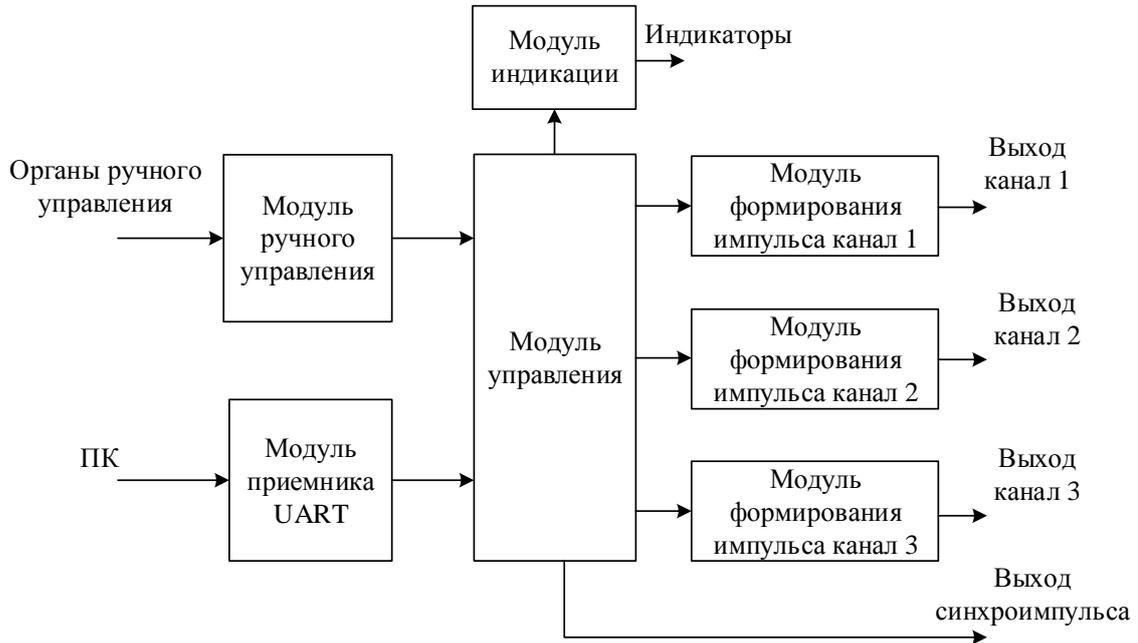


Рисунок 4.1 – Структурная схема блока управления АИ ТИС

Согласно структурной схеме, представленной на рисунке 4.1 блок имеет три выходных канала формирования управляющих импульсов, а именно канал 1 – для формирования ИПП, канал 2 – для формирования ИСФ и канал 3 – вспомогательный. Блок управления предполагает, как ручное управление параметрами формируемых импульсов либо с помощью органов управления, расположенных на корпусе, либо с использованием программы на ПК, так и автоматическое управление параметрами по заданному алгоритму и записанным в памяти значениям параметров. На рисунке 4.2 представлена структурная схема одного из трех каналов формирования выходного импульса.



Рисунок 4.2 – Структурная схема модуля формирования выходного импульса

Особенностью данной схемы формирования импульса является реализация прецизионного шага изменения параметров длительности и задержки выходного формируемого импульса. Минимальный шаг изменения параметра длительности и задержки выходного импульса составляет 100 пс и, реализован данный шаг перестройки на основе управляемого модуля фазовой автоподстройки тактовой частоты в ПЛИС.

На рисунке 4.3 представлен внешний вид блока управления АИ ТИС.



Рисунок 4.3 –Блок управления АИ ТИС

На рисунке 4.4 представлено разработанное программное обеспечение для управления АИ ТИС с использованием ПК. Управление производится через асинхронный последовательный интерфейс RS-323. Программа позволяет управлять параметрами длительности и задержки импульсов трех каналов блока

управления АИ ТИС. Так же в программе имеется возможность настраивать параметры автоматического режима управления задержек формирования импульсов управления фотоприёмником и устройством подсвета, причем как с установкой шага изменения параметра, так и загрузкой последовательности параметров из внешнего файла. Автоматический режим управления благодаря синхронизации кадровой частоты видеокамеры системы с блоком управления позволяет формировать изображения АИ ТИС с привязкой параметров импульсов стробирования и подсвета в каждом отдельном кадре, что в свою очередь позволяет формировать в кадрах АИ ТИС изображения различных АЗВ и реализовать как различные алгоритмы измерения параметров форм АЗВ, так и алгоритмы измерения дальности.

Последовательный порт RS-232

Подключение Отключение

Статус

Разрешить ручное управление

Импульсов в кадре

100

Подсвет

Длительность подсвета

10 5 нс/шаг

Задержка подсвета

0 5 нс/шаг 0,1 нс/шаг

вкл

Сканер ЭОП

Из файла

1 Импульсов

0.5 Шаг сканирования, нс

0 Начальное значение, нс

1 Кадровый делитель

Режим сканирования

внутрикадровый

Двухкадровый

межкадровый

0 Адрес памяти

ЭОП 1

Длительность ЭОП 1

10 5 нс/шаг

Задержка строб. ЭОП 1

0 5 нс/шаг 0,1 нс/шаг

вкл

ЭОП 2

Длительность ЭОП 2

10 5 нс/шаг

Задержка строб. ЭОП 2

0 5 нс/шаг 0,1 нс/шаг

вкл

Сканер подсвета

Из файла

1 Импульсов

0.5 Шаг сканирования, нс

0 Начальное значение, нс

1 Кадровый делитель

Режим сканирования

внутрикадровый

Двухкадровый

межкадровый

0 Адрес памяти

Рисунок 4.4 – Окно программы для управления АИ ТИС

Вид экспериментального макета АИ ТИС представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Вид экспериментального макета АИ ТИС

Основные технические характеристики макета представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1– Основные технические характеристики экспериментального макета АИ ТИС

Дальность видения системы, м	До 180
Угол поля зрения системы, град	12
Оптическая мощность подсвета в импульсе, Вт	320
Длина волны излучения подсвета, нм	842
Частота повторения импульсов подсвета, Гц	50–4950
Длительность ИПП, нс	30–120
Длительность импульсов стробирования ЭОП, нс	30–120
Регулировка длительности импульсов, нс	Плавно ~ 2
Шаг регулировки задержки стробирования, нс	0,1
Глубина активной зоны видения, м	9–36
Регулировка тока накачки излучателя	Есть
Регулировка напряжения ЭОП	Есть
Контроль формы импульсов на ЭОП	Есть
Объектив	Юпитер–9 2.0/85

## 4.2 Экспериментальное исследование ММИД

Для проведения экспериментального исследования ММИД согласно описанию данного метода, представленному в пункте 2.1 необходимо получить два кадра с изображением наблюдаемой области пространства. Причем первый кадр должен содержать изображение наблюдаемых объектов в первой АЗВ с некоторой начальной задержкой стробирования, определяющей ее пространственное положение по дальности. Второй кадр должен содержать изображение наблюдаемых объектов в суммарной АЗВ, с такой же начальной задержкой стробирования, как для первой АЗВ, определяющей ее пространственное положение по дальности. Для этого требуется выполнить поочередную видеосъемку объектов наблюдения на выбранной трассе наблюдения [98]. Первоначально экспериментальные исследования ММИД проходили в коридоре 4 этажа радиотехнического корпуса ТУСУР. Коридор имеет протяженность 40 м и ширину 2,5 м. На данной трассе были установлены в качестве объектов наблюдения транспаранты на дистанциях: 8; 10; 12; 14; 16; 18; 20; 22 м. Транспарант представляет собой лист белой бумаги с нанесенной на нем цифрой, означающей расстояние до него. На рисунке 4.6 представлена трасса наблюдения.



Рисунок 4.6 – Трасса наблюдения

Транспаранты установлены таким образом, чтобы все они попали в узкое поле зрения экспериментального макета АИ ТИС. Расстояние до каждого транспаранта настраивалось их перемещением по трассе и контролировалось лазерным дальномером с точностью не менее 0,01 м. Некоторые транспаранты

имеют регулировку по высоте. Цель проводимого эксперимента заключалась в получении формы измерительной функции ММИД ее калибровки и дальнейшем построении «карты глубин» наблюдаемого пространства.

#### **4.2.1 Экспериментальное исследование 20-ти зонного ММИД при измерении дальности до объекта**

Для получения отсчетов измерительной функции ММИД и ее последующей калибровки был проведен эксперимент с измерением дальности до одиночного объекта, расположенного в поле зрения системы для 20-ти зонного ММИД без применения метода коррекции и с применением коррекции нелинейности измерительной функции. Эксперимент проводился с изменением дистанции от 8 до 20 м с шагом 2 м. В качестве объекта интереса использовался одиночный транспарант в виде белого листа бумаги.

Для каждой дистанции были получены кадр, содержащий первую АЗВ, и кадр, содержащий суммарную АЗВ. Далее, согласно выражению (2.3) по значениям средней яркости в этих кадрах на объекте интереса для всех выбранных положений транспарантов были получены отсчеты значений измерительных функций по дальности. Далее полученная форма измерительной функции аппроксимируется по методу наименьших квадратов линейной функцией.

Полученные коэффициенты являются калибровочными коэффициентами данной измерительной функции и далее будут использованы для калибровки кадров отношения и построения «карты глубин» наблюдаемого пространства. Так же отсчеты полученной измерительной функции и ее аппроксимирующая функция использованы для вычисления абсолютных ошибок измерения дальности путем нахождения их разницы.

Эксперимент по измерению дальности по одиночному объекту выполнен для 20-зонного ММИД в первом случае с фиксированным шагом между локальными АЗВ равным 5 нс и во втором случае с различным шагом между каждой из локальных АЗВ в целях коррекции нелинейности измерительной функции.

Эксперимент по измерению дальности ММИД по одиночному объекту проводился при длительности ИПП, равной 30 нс и длительности импульса стробирования ЭОП, равной 140 нс.

Осциллограммы ИПП и стробирования ЭОП для формирования первой АЗВ 20-ти зонного ММИД приведены на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Осциллограммы ИПП (желтый) и стробирования ЭОП (зеленый) для формирования первой АЗВ 20-ти зонного ММИД

На рисунке 4.8 представлено изображение с АИ ТИС транспаранта в кадре с первой АЗВ и находящегося на дальности 8 м от системы.

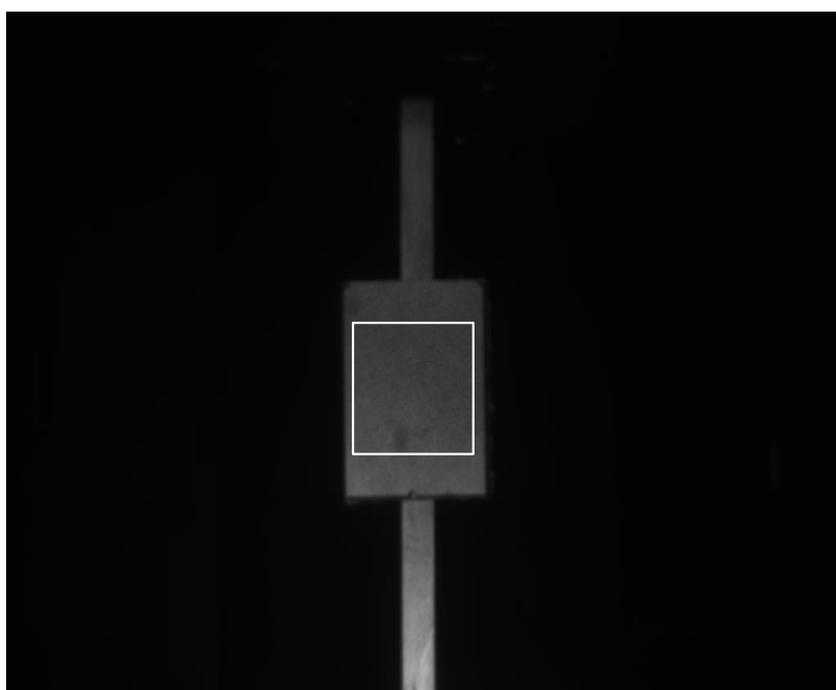


Рисунок 4.8 – Изображение транспаранта в кадре с первой АЗВ

На рисунке 4.9 белой рамкой отмечена область измерения средней яркости на данном объекте. На рисунке представлено изображение транспаранта, что и на рисунке выше, но уже во втором кадре в суммарной АЗВ.

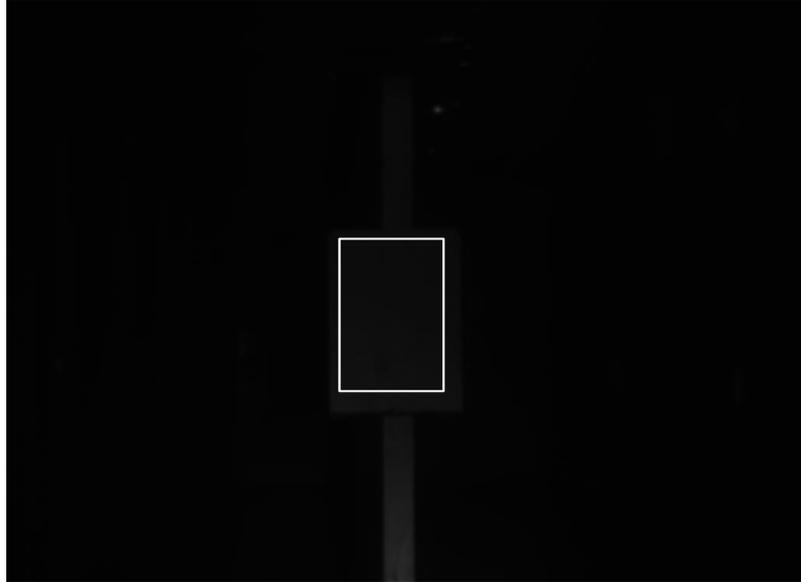


Рисунок 4.9 – Изображение транспаранта в кадре с суммарной АЗВ

Таким образом перемещая транспарант по трассе с шагом в 2 м производилась его съемка и измерение значений отсчетов первой и суммарной АЗВ. На рисунке 4.10 представлены отсчеты формы первой АЗВ.

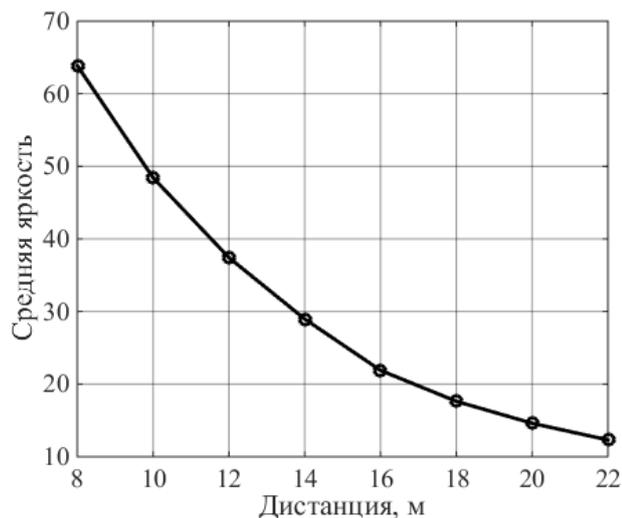


Рисунок 4.10 – Отсчеты первой АЗВ

На рисунке 4.11 представлены отсчеты суммарной АЗВ.

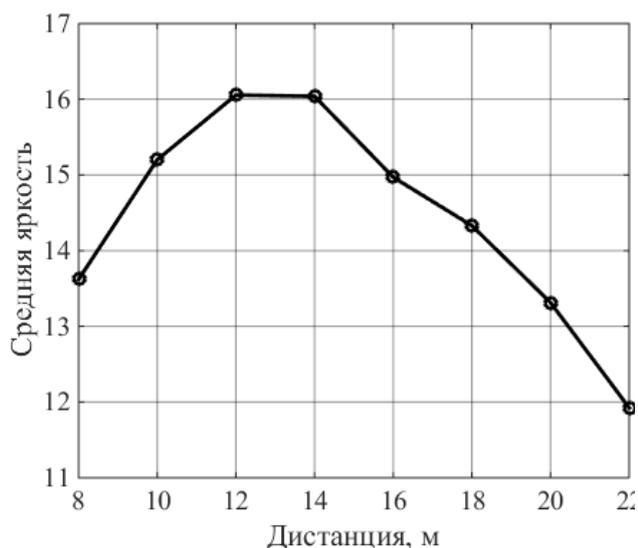


Рисунок 4.11– Отсчеты суммарной АЗВ

Для нахождения отсчётов измерительной функции производилось деление отсчетов суммарной АЗВ (рисунок 4.11) на отсчеты первой АЗВ (рисунок 4.10).

Далее был проведен аналогичный эксперимент, с применением алгоритма коррекции нелинейности измерительной функции. Для этого в специально разработанной программе, интерфейс которой приведен на рисунке 4.12, были подобраны частные приращения задержек для каждой из 20-ти локальных зон.

Моделирование ММИД в данной программной модели производится с использованием реальной формы АЗВ, полученной с макета системы. При помощи нее строится суммарная АЗВ, далее находится отношение суммарной АЗВ к первой одиночной, по которому строятся графики измерительной функции по дальности и производится ее аппроксимация прямолинейной функцией и выполняется расчет среднеквадратической ошибки по дальности. Подбирая значения приращения задержек для суммирующихся локальных зон, производится коррекция нелинейности измерительной функции по дальности.

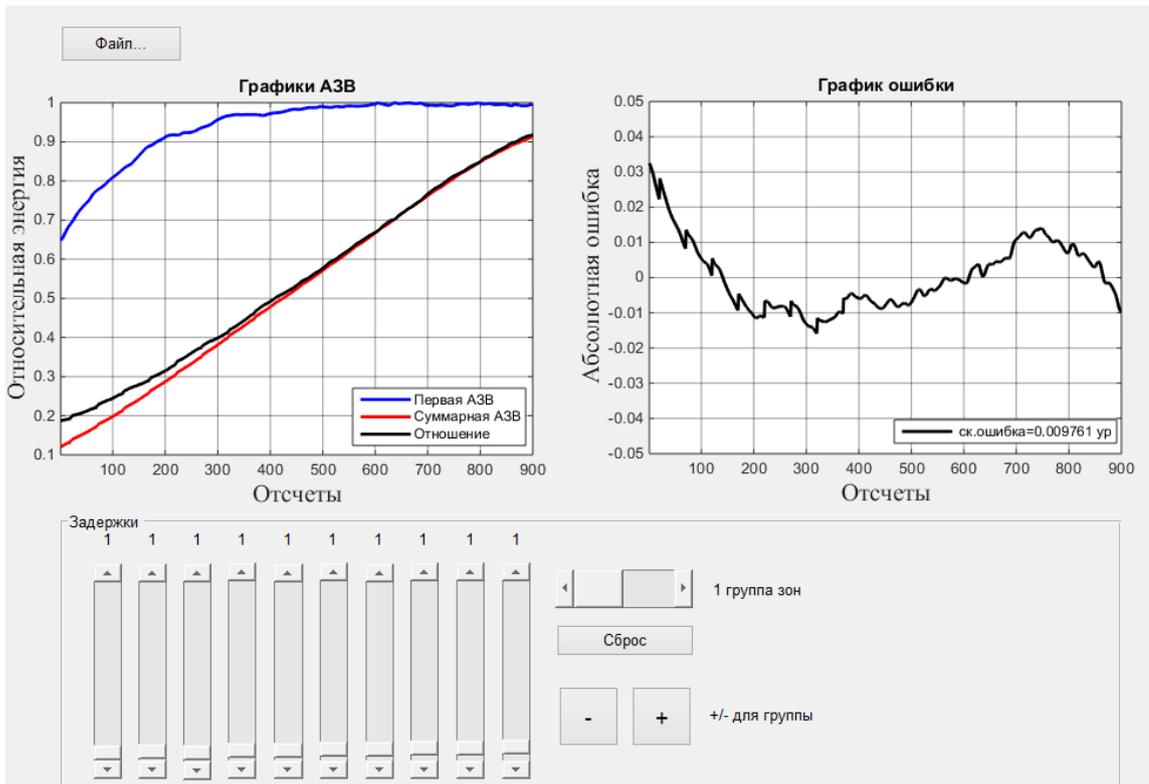


Рисунок 4.12 – Программа коррекции измерительной функции

Таким образом, были определены значения приращения задержек стробирования для каждой из локальных зон, которые представлены в виде графика на рисунке 4.13.

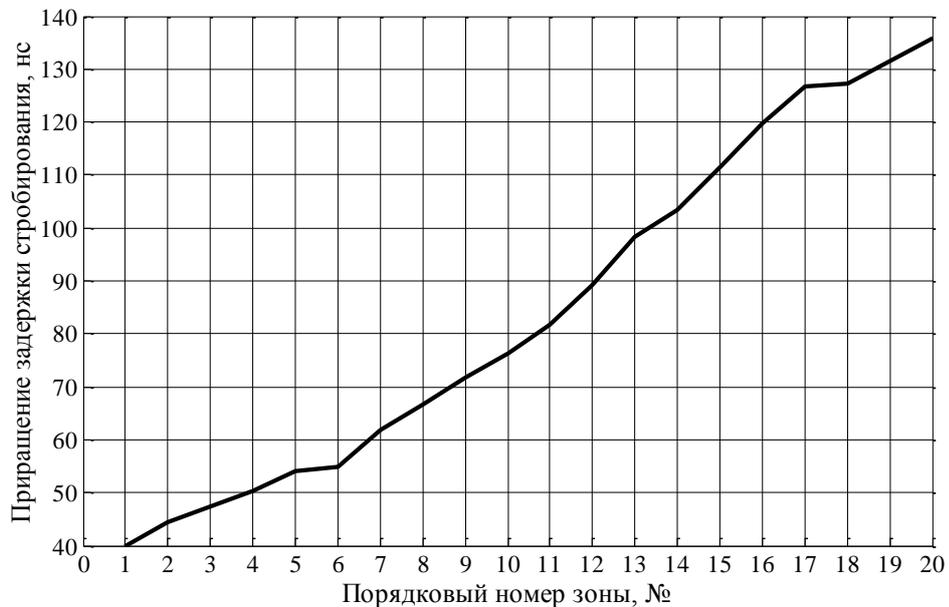


Рисунок 4.13 – График приращения задержек стробирования для каждой из  
ЛОКАЛЬНЫХ ЗОН

На рисунке 4.14 представлены осциллограммы ИПП и стробирования ЭОП для формирования суммарных АЗВ для 20-ти зонного до коррекции нелинейности измерительной функции (а) и после внесения изменений (б) в значения задержек суммарных зон согласно графику (рисунок 4.11).

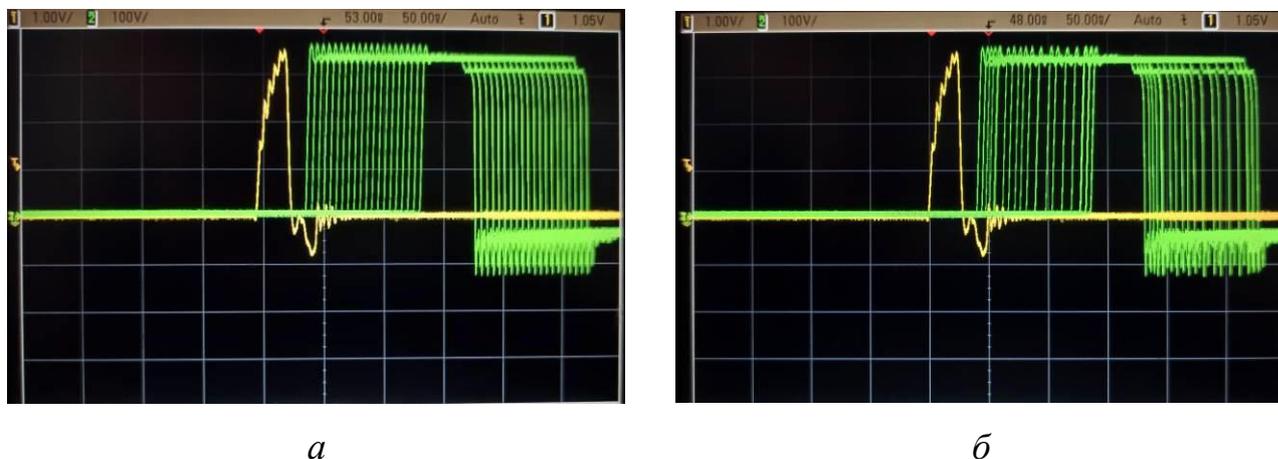


Рисунок 4.14 – Осциллограммы ИПП (желтая) и стробирования ЭОП (зеленая) для формирования суммарных АЗВ 20-ти зонного ММИД до коррекции (а) и после коррекции (б)

На рисунке 4.15 приведены графики, полученные в ходе эксперимента для измерительных функций (пунктирная линия) до коррекции (а) и после коррекции (б) включая аппроксимирующие их линии (сплошная линия).

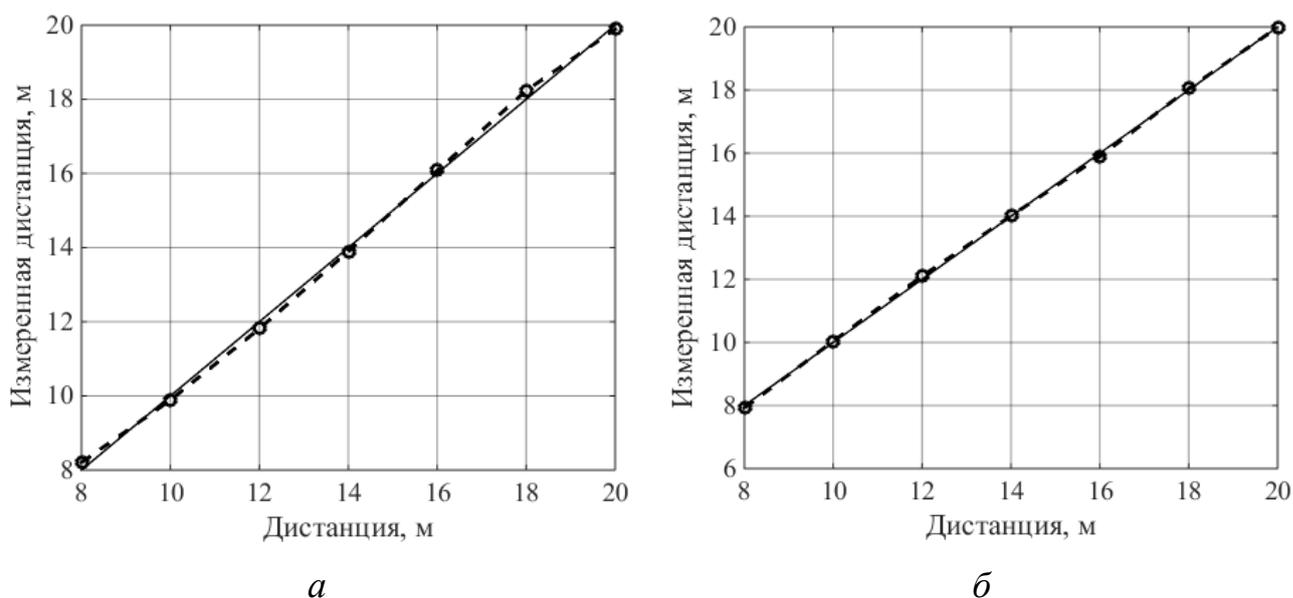


Рисунок 4.15 – Графики измерительных функций до коррекции (а) и после коррекции (б) для 20-ти зонного ММИД

На рисунке 4.16 представлены графики абсолютной ошибки линейности измерительной функции по дальности до коррекции (сплошная) и после коррекции (пунктир).

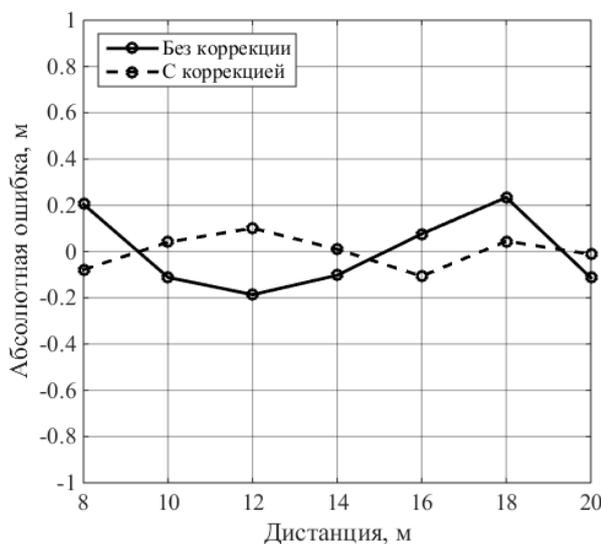


Рисунок 4.16 – Графики абсолютной ошибки линейности измерительной функции по дальности до коррекции (сплошная) и после коррекции (пунктир)

Таким образом, для 20-ти зонного ММИД по одиночному объекту среднеквадратическая ошибка измерительной функции по дальности до применения алгоритма коррекции нелинейности составила 0,165 м. После коррекции среднеквадратическая ошибка измерительной функции равна 0,066 м.

В таблице 4.2 приведены результаты измерения дальности до транспарантов для 20-ти зонного ММИД. Для сравнения, в таблицу 4.2 также включены значения дистанции до транспаранта, измеренные лазерным дальномером.

Эксперимент с измерением дальности до одиночного объекта дал следующие результаты. Для 20-ти зонного ММИД алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции позволил уменьшить среднеквадратичную ошибку измерительной функции в 2,5 раза. При этом в данном эксперименте были получены калибровочные коэффициенты линейной функции, которой была аппроксимирована экспериментальная кривая [99]. Значение калибровочных коэффициентов измерительной функции для углового коэффициента составляет  $k = -0,1287$ , а для свободного члена  $b = 0,0477$ .

Таблица 4.2 – Измеренная дистанция до транспаранта при помощи 20-ти зонного ММИД

Измеренная дистанция лазерным дальномером, м	Измеренная дистанция 20 зон ММИД (без коррекции), м	Измеренная дистанция 20 зон ММИД (с коррекцией), м
8,030	8,204	7,921
10,038	9,888	10,041
12,004	11,813	12,101
13,970	13,897	14,009
15,996	16,076	15,893
18,050	18,234	18,045
19,983	19,886	19,988

#### **4.2.2 Экспериментальное исследование 20-ти зонного ММИД при измерении расстояний до группы объектов**

Далее представлены результаты экспериментального исследования 20-ти зонного ММИД при измерении расстояний до группы объектов и последующего построения «карты глубины» пространства.

В качестве группы объектов использовались транспаранты, установленные на определенные расстояния от макета АИ ТИС, как показано на рисунке 4.6. Параметры системы в данном эксперименте соответствуют параметрам вышеописанного в пункте 4.2.1 эксперимента.

Измерения производились следующим образом: с системы были получены два видеокadra. Первый видеокادر содержит изображение, наблюдаемого пространства в первой АЗВ, и второй видеокادر содержит изображение наблюдаемого пространства в суммарной АЗВ. Далее для получения отсчетов измерительной функции производилось деление средней яркости каждого изображения транспаранта из кадра с суммарной АЗВ на соответствующее значение средней яркости изображения транспаранта из кадра с первой АЗВ.

На рисунке 4.17 представлено изображение с АИ ТИС объектов в кадре с первой АЗВ.

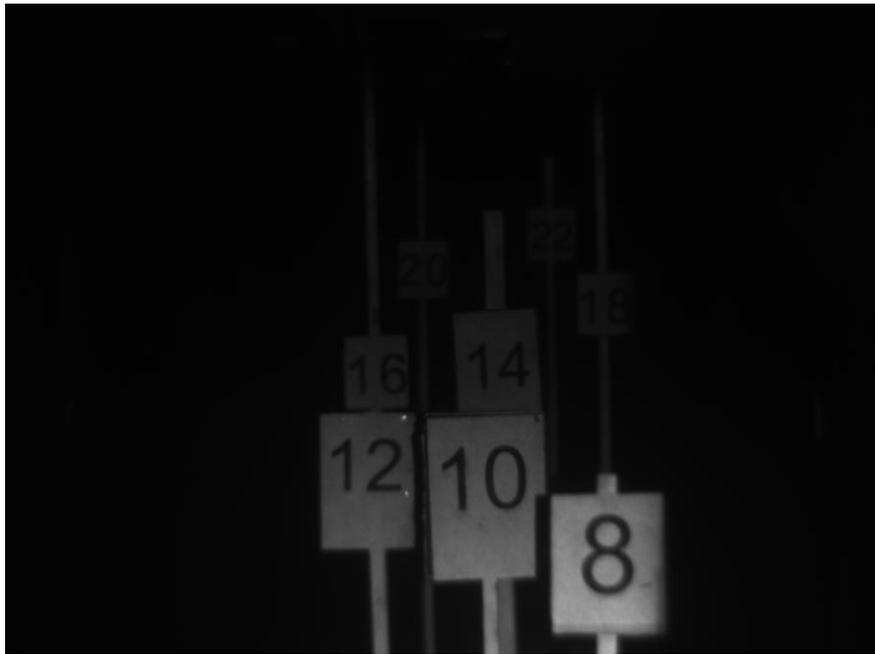


Рисунок 4.17 – Изображение объектов в кадре с первой АЗВ

На рисунке 4.18 представлено изображение транспаранта тех же объектов что и на рисунке 4.17, но во втором кадре с суммарной АЗВ.

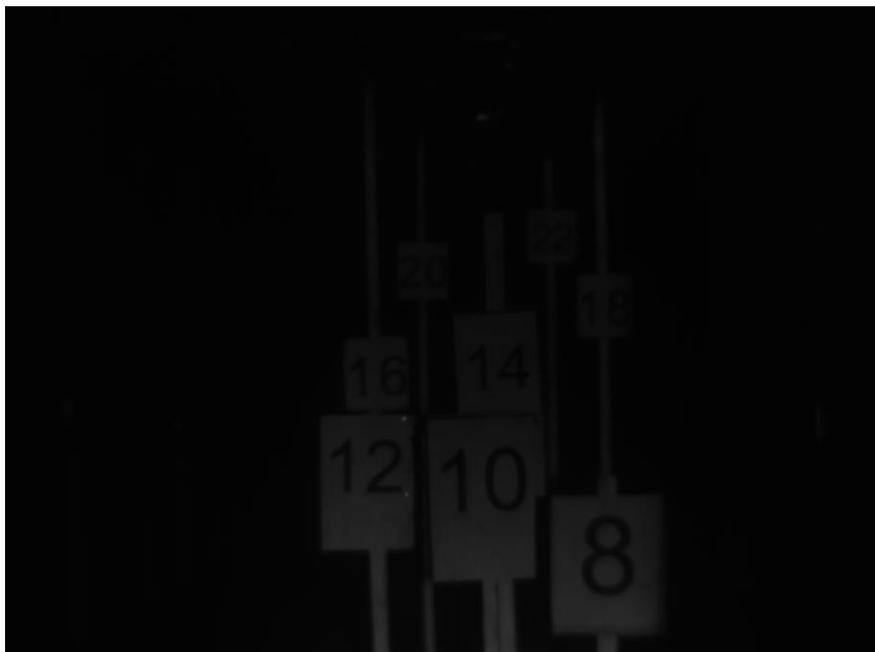


Рисунок 4.18 – Изображение объектов в кадре с суммарной АЗВ

На рисунке 4.19 показаны графики, полученные в ходе эксперимента при формировании отсчетов измерительных функций по дальности до коррекции (а) и после коррекции (б) включая аппроксимирующие их линии (сплошная линия).

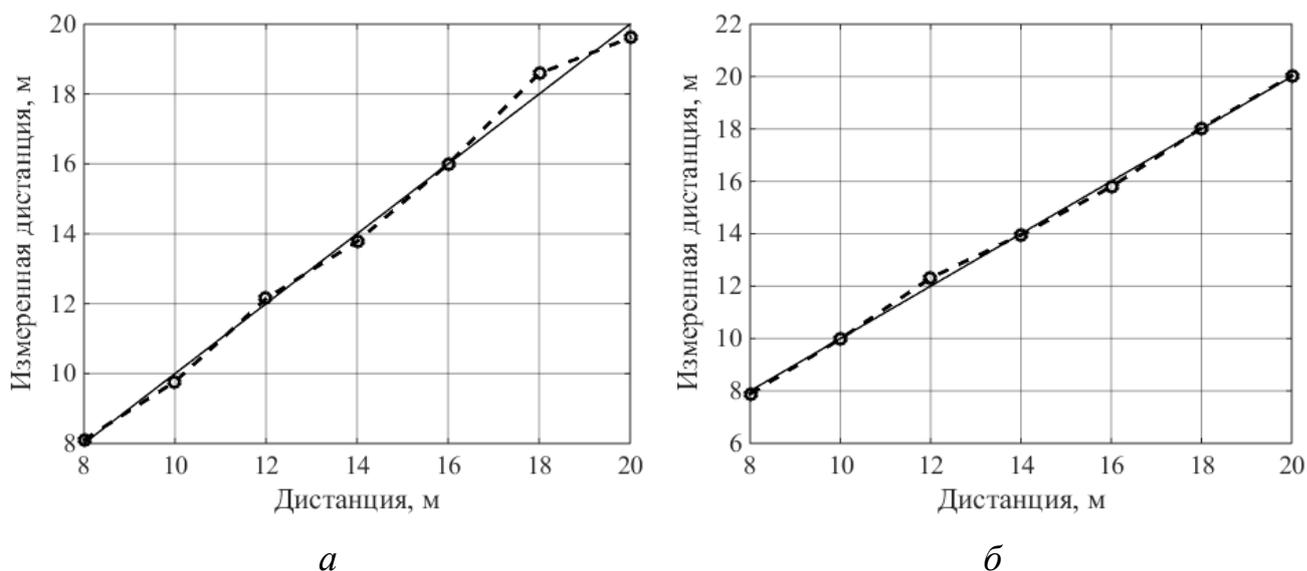


Рисунок 4.19 – График измерительной функции по дальности до коррекции (а) и после коррекции (б) для 20-ти зонного ММИД

На рисунке 4.20 представлены графики абсолютной ошибки линейности измерительной функции по дальности до коррекции (сплошная) и после коррекции (пунктирная).

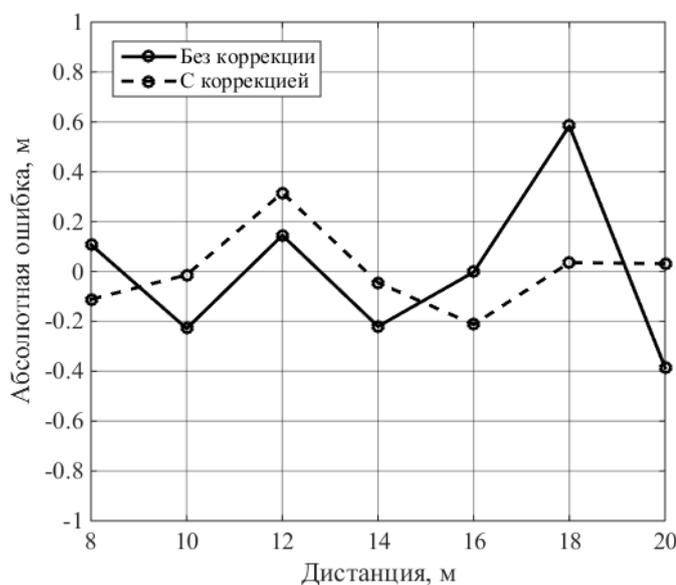


Рисунок 4.20 – Графики абсолютной ошибки линейности измерительной функции до коррекции (сплошная) и после коррекции (пунктирная)

Таким образом, для 20-ти зонного ММИД при измерении дальностей для группы объектов среднеквадратическая ошибка измерительной функции по дальности до применения алгоритма коррекции нелинейности составила 0,2316 м.

После коррекции среднеквадратическая ошибка измерительной функции стала равна 0,1227 м.

Для получения «карты глубины» наблюдаемого пространства, необходимо произвести деление кадра, содержащего суммарную АЗВ, на кадр, содержащий первую АЗВ. Полученные значения яркости пикселей  $I(x, y)$  будут лежать в диапазоне от 0 до 1. Далее используя калибровочные коэффициенты  $k$  и  $b$  полученные в эксперименте по одиночному объекту и подставив значения пикселей  $I(x, y)$  кадра их отношения в следующее уравнение получим результирующую «карту глубины»:

$$D(x, y) = \frac{(I(x, y) - b)}{k}. \quad (4.1)$$

Таким образом, реализуется определение дистанции до наблюдаемых объектов в каждом пикселе результирующего изображения, что является «картой глубин» наблюдаемого пространства. Калибровочное уравнение (4.1) связывает яркость пикселя объекта интереса с его дальностью.

На рисунке 4.21 представлена «карта глубин», построенная на основе 20-ти зонного ММИД с применением алгоритма коррекции нелинейности измерительной функции.

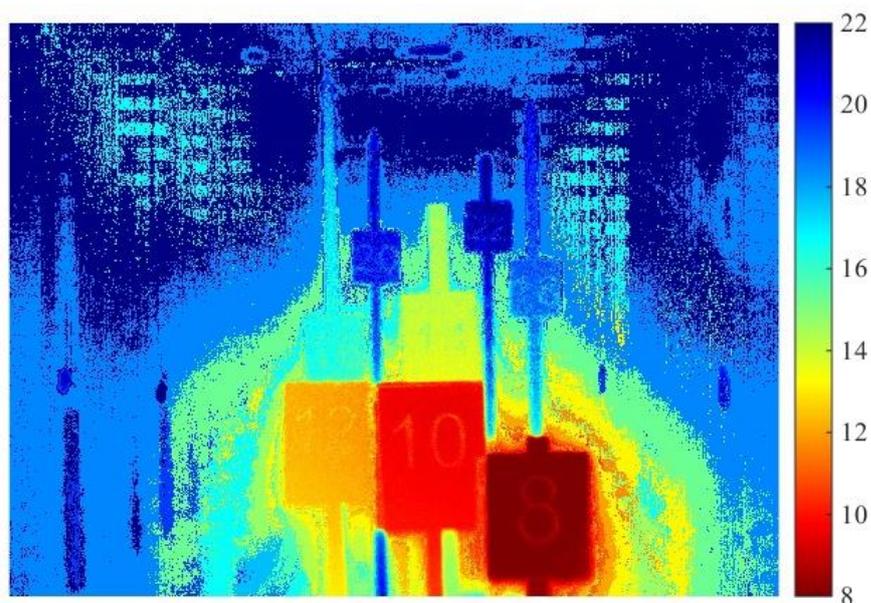


Рисунок 4.21 – «Карта глубин», построенная на основе 20-ти зонного ММИД

В таблице 4.3 приведены результаты измерения дальности до транспарантов при помощи построенных «карт глубин» пространства для 20-ти зонного ММИД. Для сравнения в таблицу 4.3, также включены значения измерения дистанции до транспарантов лазерным дальномером и значения дистанции, указанные на транспарантах.

Таблица 4.3 – Измеренная дистанция до транспарантов для 20-ти зонного ММИД

Дистанция, указанная на транспаранте, м	Измеренная дистанция лазерным дальномером, м	Измеренная дистанция 20 зонного ММИД (без коррекции), м	Измеренная дистанция 20 зонного ММИД (с коррекцией), м
8	7,970	7,907	7,769
10	10,030	9,712	9,946
12	12,015	12,165	12,319
14	13,975	13,893	14,041
16	15,980	16,280	16,054
18	18,030	18,811	18,114
20	19,995	19,923	20,211

В ходе проведенных экспериментов были получены следующие результаты. Применение алгоритма коррекции нелинейности измерительной функции, когда в поле зрения системы присутствовали одновременно несколько объектов, с использованием 20-ти зонного ММИД, позволило уменьшить среднеквадратичную ошибку измерения дальности в 1,89 раза.

#### **4.3 Экспериментальные исследования влияния шума фотоприемника на точность измерения дальности в ММИД**

Для оценки влияния шума фотоприемника макета АИ ТИС на точность измерения дальности в ММИД был проведен эксперимент с многократным измерением дальности до одиночного объекта, расположенного в поле зрения системы [100]. Эксперимент проводился с изменением дистанции от 8 до 20 м с шагом 1 м. В качестве объекта интереса использовался транспарант в виде белого листа бумаги. Эксперимент многократного измерения дальности до одиночного объекта выполнен для 100-зонного ММИД с фиксированным шагом между

локальными АЗВ и равным 1 нс. Эксперимент проводился при длительности ИПП, равной 30 нс и длительности импульса стробирования ЭОП, равной 140 нс.

Для каждой дистанции было получено по 200 кадров, содержащих первую АЗВ, и 200 кадров, содержащих суммарную АЗВ. На рисунке 4.22 представлен результат двухсот измерений средней яркости транспаранта в первом кадре с первой АЗВ на дальностях от 8 м до 20 м с шагом 1 м.

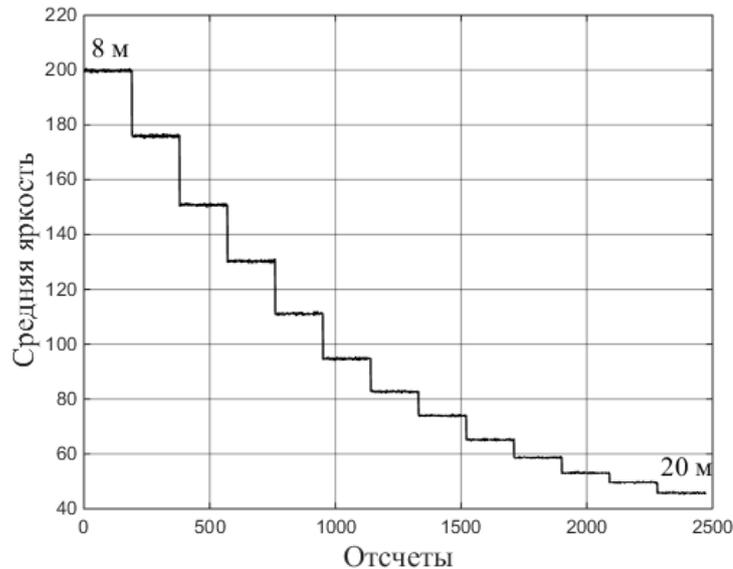


Рисунок 4.22 – График значений средней яркости транспаранта в кадре с первой АЗВ для двухсот измерений на каждой дальности

На рисунке 4.23 представлен результат двухсот измерений средней яркости транспаранта во втором кадре с суммарной АЗВ на дальностях от 8 м до 20 м с шагом 1 м.

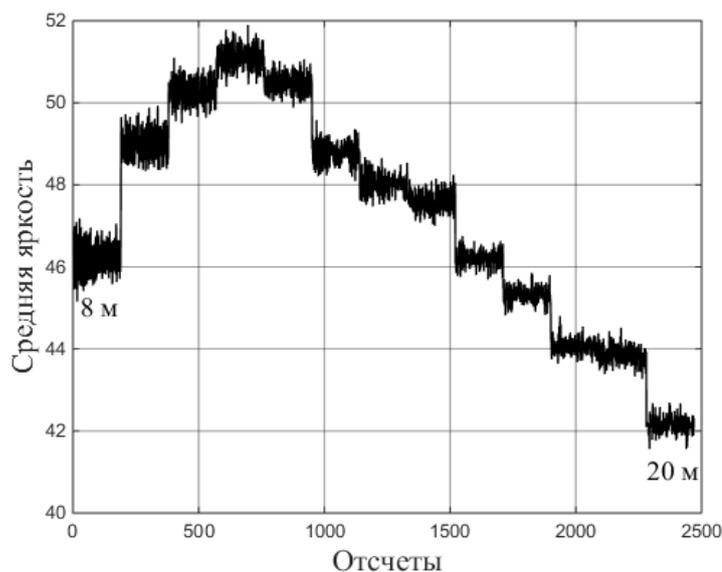


Рисунок 4.23 – График значений средней яркости транспаранта в кадре с суммарной АЗВ для двухсот измерений на каждой дальности

Далее произведено усреднение результатов двухсот измерений средней яркости транспаранта в кадрах с первой и суммарной АЗВ для каждой дальности.

На рисунке 4.24 представлен график средних значений двухсот измерений средней яркости транспаранта в первом кадре с первой АЗВ.

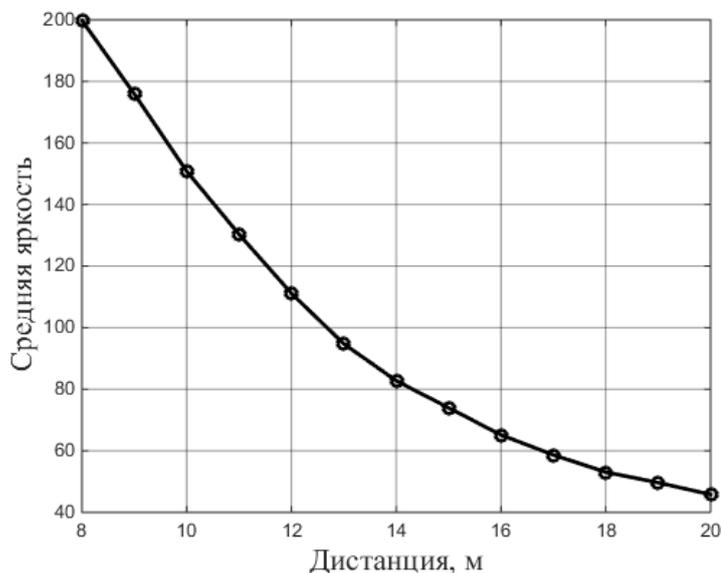


Рисунок 4.24 – График средних значений результата двухсот измерений яркости в кадре с первой АЗВ

На рисунке 4.25 представлен график средних значений двухсот измерений средней яркости транспаранта во втором кадре с суммарной АЗВ.

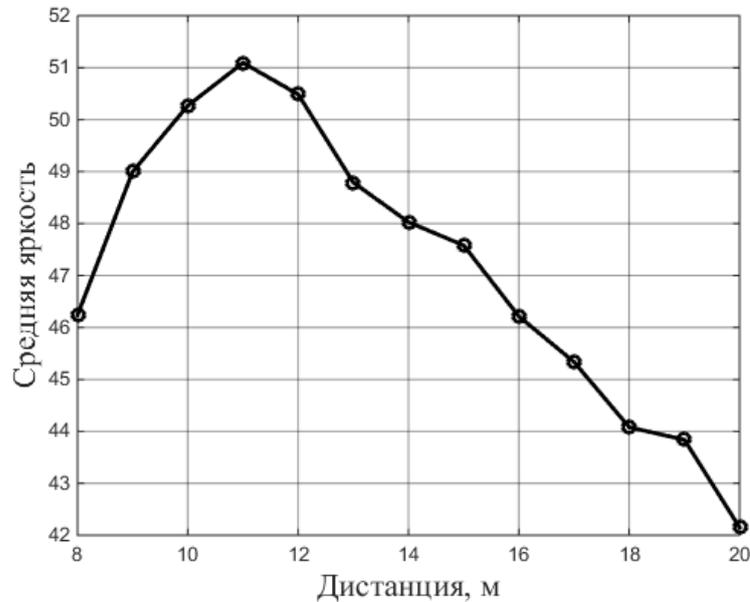


Рисунок 4.25– График средних значений результата двухсот измерений яркости в кадре с суммарной АЗВ

Для оценки уровня шума, на изображении транспаранта в кадрах с первой и суммарной АЗВ, по результатам двухсот измерений средней яркости производилось вычисление СКО для каждой дальности. На рисунке 4.26 представлены графики зависимости СКО двухсот измерений средней яркости транспаранта в кадрах с первой и суммарной АЗВ.

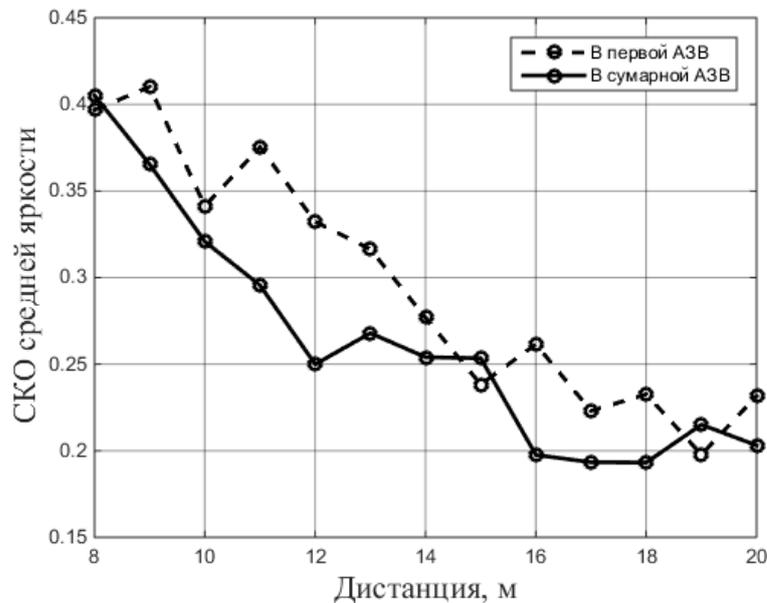


Рисунок 4.26 – Графики значений СКО средней яркости транспаранта в первой (пунктир) и суммарной (сплошной) АЗВ

Далее, согласно выражению (2.3) по значениям средней яркости транспаранта в кадрах с первой и суммарной АЗВ для всех выбранных положений транспаранта были получены по 200 отсчетов измерительной функции по дальности. На рисунке 4.27 представлен график измерительной функции 100-зонного ММИД для двухсот измерений на дальностях от 8 м до 20 м с шагом 1 м.

Значения измерительной функции пронормированы к значениям фактических расстояний до транспаранта для дальнейшего вычисления абсолютной ошибки измерения дальности для всех положений транспаранта.

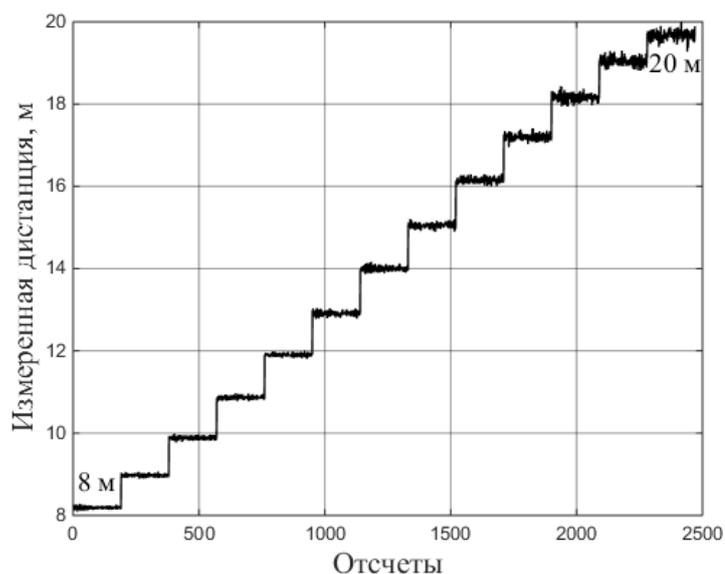


Рисунок 4.27 – График измерительной функции 100-зонного ММИД по результатам двухсот измерений

На рисунке 4.28 представлен результат усреднения двухсот значений измерительной функции для каждой дальности до транспаранта.

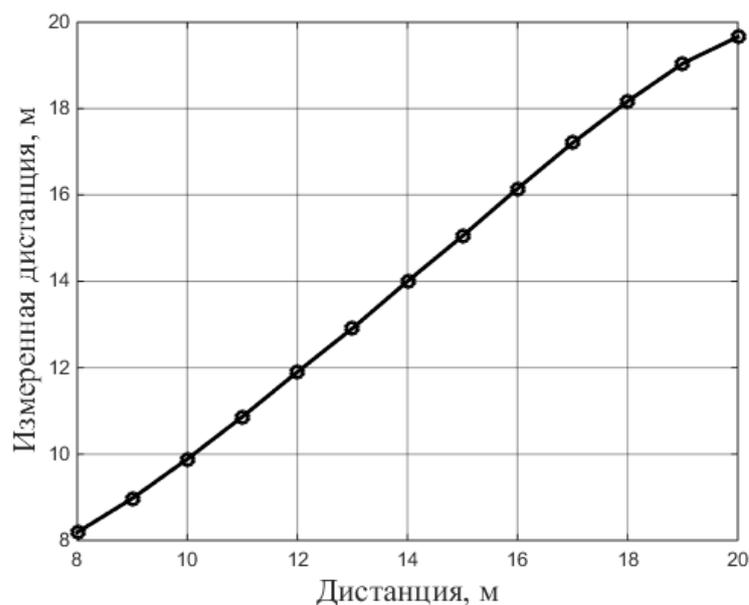


Рисунок 4.28 – График измерительной функции 100-зонного ММИД по усредненным результатам двухсот измерений

Для расчета значений абсолютной ошибки измерения дальности по результатам двухсот измерений была найдена разность между значениями нормированной измерительной функции и фактическими значениями расстояний до транспаранта. На рисунке 4.29 представлен график абсолютной ошибки измерения дальности по результатам двухсот измерений каждого положения транспаранта.

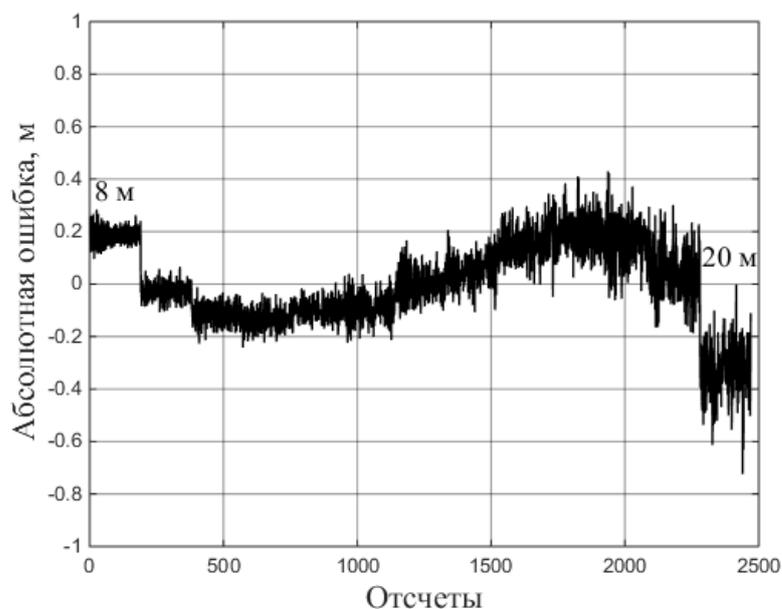


Рисунок 4.29 – График абсолютной ошибки измерения дальности по результатам двухсот измерений

На рисунке 4.30 представлен результат усреднения двухсот значений абсолютной ошибки измерения дальности для каждого положения транспаранта.

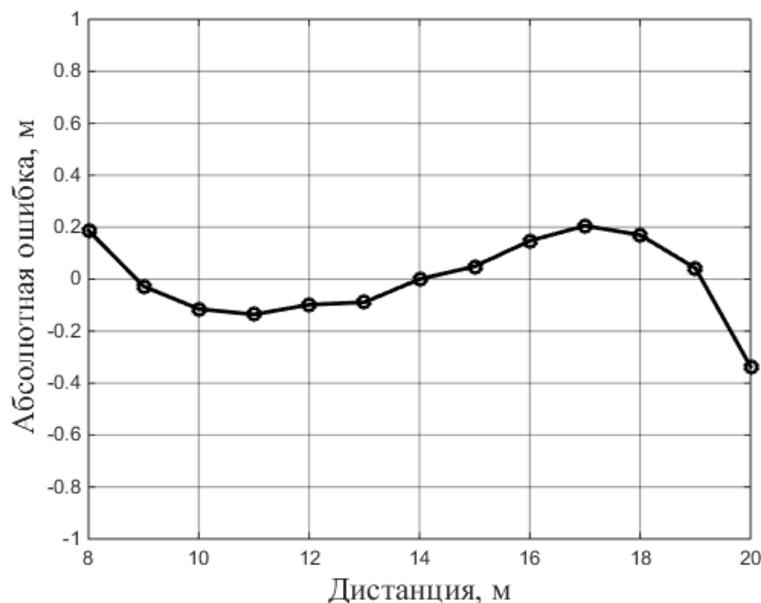


Рисунок 4.30 – График абсолютной ошибки измерения дальности по усредненным результатам двухсот измерений

Для оценки влияния шума фотоприёмника, на точность измерения дальности для каждого положения транспаранта было получено СКО значений абсолютной ошибки измерения дальности по результатам двухсот измерений. Зависимость среднеквадратической ошибки измерения дальности от расстояния по результатам двухсот измерений в диапазоне от 8 м до 20 м с шагом 1 м представлена на рисунке 4.31.

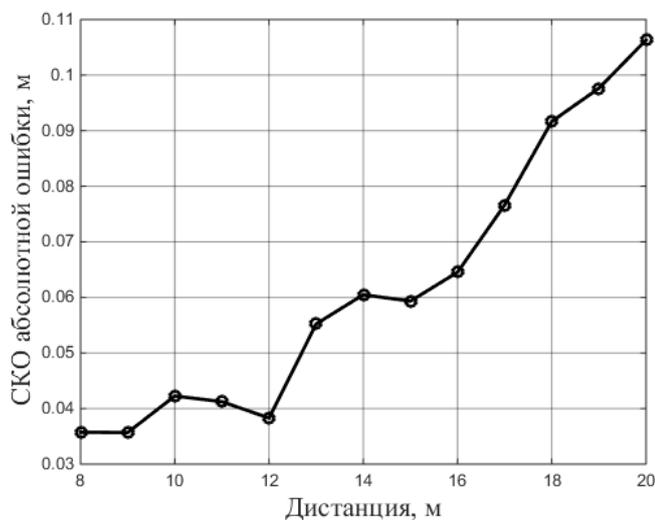


Рисунок 4.31 – График зависимости среднеквадратической ошибки измерения дальности от расстояния по результатам двухсот измерений

Результаты экспериментального исследования, представленного на рисунке 4.31 свидетельствуют об увеличении ошибки измерения дальности в следствии влияния шума фотоприемника макета АИ ТИС. Данные результаты схожи по характеру с результатами моделирования влияния шума фотоприемника на точность измерения дальности (рисунок 3.17).

#### **4.4 Экспериментальное исследование АИ ТИС на полигоне**

Для исследования ММИД в АИ ТИС в реальных условиях были проведены натурные испытания экспериментального макета системы на полигоне НИИ РТС ТУСУР. Испытания на полигоне проводились с использованием системы построения ортофотопланов местности беспилотным воздушным судном (СПОМБВС) и геодезическим средством измерения, являющимся эталонным для построения плана местности и фиксации расстояний между объектами на местности.

Полигон представлял собой неровный участок местности с расположенными на нем различными объектами (радар, КУНГ), и в том числе, и транспарантами. Макет АИ ТИС устанавливался на полигоне таким образом, чтобы охватить большую часть объектов на полигоне без перемещения системы, а только вращая макет системы вокруг своей оси на штативе для сохранения географической привязки к месту его установки. Макет АИ ТИС и транспаранты были установлены на заранее скоординированные на местности «реперные точки». Координация «реперных точек» производилась СПОМБВС и геодезическим средством измерения координат.

Измерения дальностей до объектов и построение «карт глубин» макетом АИ ТИС с использованием ММИД производилось при параметрах, представленных в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Параметры ММИД

Параметр	Значение
Длительность стробирования фотоприемника, нс	200
Длительность ИПП, нс	30
количество локальных АЗВ	100
шаг между локальными АЗВ, нс	1,4

Также в зависимости от дальности расположения объектов наблюдения устанавливалась начальная задержка стробирования при которой наблюдаемые объекты были в положительном контрасте на изображениях в кадрах с первой и суммарной АЗВ.

Расположение объектов (КУНГ, транспаранты, радар) наблюдения на полигоне представлено на рисунках 4.32 – 4.33.



Рисунок 4.32 – Расположение КУНГа и транспарантов



Рисунок 4.33 – Расположение радара

В связи с узким углом поля зрения макета АИ ТИС, который составляет 12 градусов, измерение дальности и построение «карт глубин» производилось для фрагментов наблюдаемых объектов, попадающих в поле зрения АИ ТИС.

На рисунке 4.34 представлена «карта глубин» для области, содержащей транспаранты.

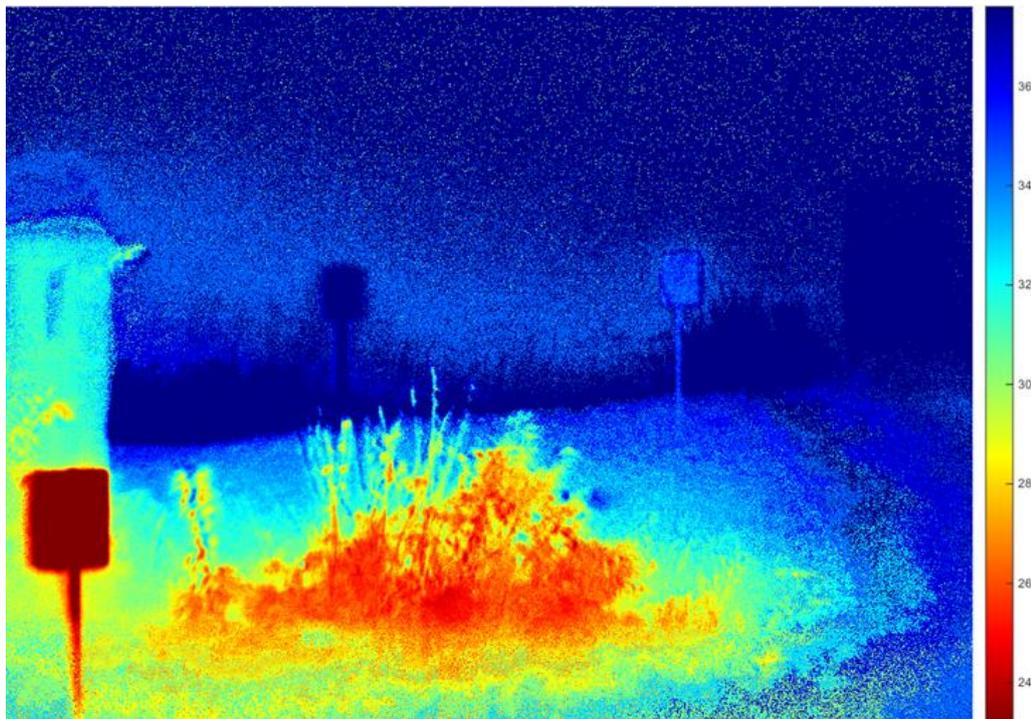


Рисунок 4.34 – «Карта глубин» области транспарантов

На рисунке 4.35 представлена «карта глубин» области с расположением радара

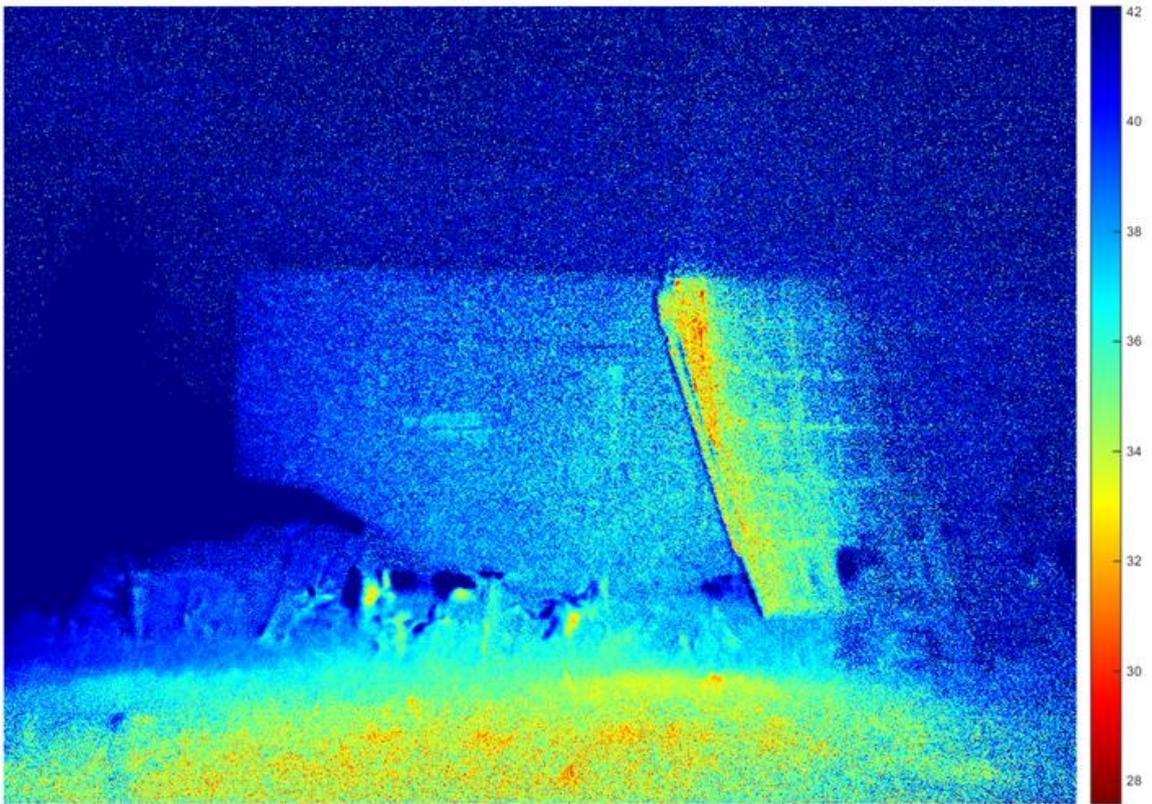


Рисунок 4.35 – «Карта глубин» области радара

На рисунке 4.36 представлена «карта глубин» области с расположением КУНГА



Рисунок 4.36 – «Карта глубин» области КУНГа

В таблице представлены результаты измерения расстояний до объектов на полигоне.

Таблица 4.5 – Результат измерения расстояний до объектов на полигоне

Объект измерения	Средство измерения		
	АИ ТИС, м	Лазерный дальномер, м	Геодезический прибор, м
Транспарант 1	11,12	11	10,94
Транспарант 2	18,5	19,06	18,95
Транспарант 3	34,78	34,97	34,74
Транспарант 4	39,62	39,95	39,74
КУНГ пр. край	25,6	25,44	-
КУНГ центр	26	25,88	-
Антенна пр. край	37,45	37,68	-
Грузовик борт	16,26	16,51	-
Грузовик колесо	18,3	18,25	-

В таблице 4.6 представлена разность результатов измерения расстояний до объектов на полигоне с использованием АИ ТИС и лазерного дальномера.

Таблица 4.6 – Разность измерений расстояний АИ ТИС и лазерным дальномером

Объект измерения	Разница измерений АИ ТИС и лазерного дальномера, м
Транспарант 1	+0,12
Транспарант 2	-0,56
Транспарант 3	-0,19
Транспарант 4	-0,33
КУНГ пр. край	+0,16
КУНГ центр	+0,12
Антенна пр. край	0,23
Грузовик борт	-0,25
Грузовик колесо	+0,05

Испытания АИ ТИС на полигоне показали, что используемый в АИ ТИС метод измерения дальности до объектов наблюдения и построения «карты глубин» наблюдаемого пространства имеет дециметровую точность измерения расстояний до объектов на рассматриваемой трассе, по сравнению с образцовым лазерным дальномером, имеющим миллиметровую точность измерения расстояний, который в данных испытаниях считался эталонным средством измерения. Акт комплексных испытаний АИ ТИС на полигоне НИИ РТС ТУСУР представлен в приложении Б.

#### 4.5 Экспериментальные исследования макета АИ ТИС в сложных условиях видения

Для исследования работы макета АИ ТИС в сложных условиях видения, а также для определения основных параметров системы при измерении дальности в условиях низкой прозрачности среды распространения оптического излучения были проведены соответствующие экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования макета АИ ТИС проводились в большой аэрозольной камере (БАК) Института оптики и атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН. Трасса наблюдения представляла собой герметичную камеру длиной 26 м и шириной 10,5 м, в которой были установлены транспаранты с шагом 3 м.

В ходе эксперимента производилось наполнение объёма камеры дымом или искусственным туманом. При этом производилась видеозапись изображений, получаемых с АИ ТИС. Видеозаписи производились при изменении задержки стробирования и соотношения длительностей импульсов подсвета пространства и стробирования ЭОП. На рисунке 4.37 представлено изображение трассы наблюдения в условиях с максимальной концентрацией дыма в камере БАК. Задержка стробирования составляла 133 нс. Длительность импульса стробирования была установлена равной 60 нс, а длительность ИПП изменялась от 30 нс до 120 нс.



Рисунок 4.37 – Изображение в условиях плотного дыма при длительности ИПП

30 нс

На рисунке 4.38 представлено изображение трассы наблюдения в условиях с максимальной концентрацией дыма в камере БАК и длительности ИПШ равной 120 нс.

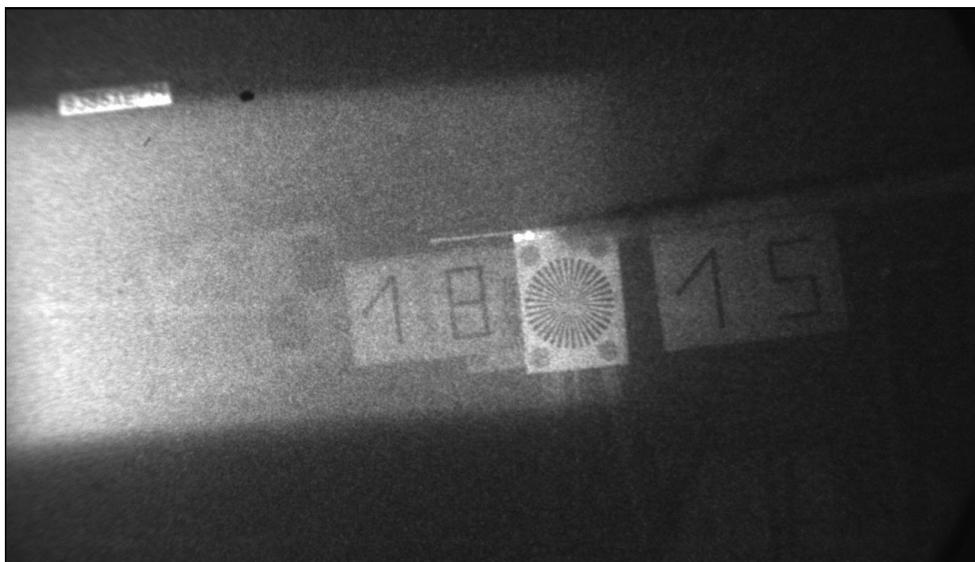


Рисунок 4.38 – Изображение в условиях плотного дыма при длительности ИПШ 120 нс

По результатам испытаний экспериментального макета АИ ТИС в БАК, составлена обширная база изображений, полученных в условиях нормальной и пониженной прозрачности среды распространения (дым, туман) в различных режимах работы системы, которые могут быть использованы для дальнейших исследований и разработок перспективного класса АИ ТИС для наблюдения и измерения дальности в условиях пониженной прозрачности среды распространения оптического излучения [101-103]. Акты использования результатов диссертационной работы приведены в приложении Б:

– «Прецизионное томографическое видение объектов телевизионными измерительными системами с активно-импульсным подсветом пространства», грант РФФИ по научному проекту № 19-37-90141, 2019–2021 гг.;

– «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» (шифр проекта 8.9562.2017/БЧ), 2017–2019 гг.;

– проведение натурных испытаний лабораторного макета АИ ТИС с установкой на разработанный силами Альянса "Техническое зрение" в городе

Томске беспилотный автомобиль, который в декабре 2019 г. принял участие в конкурсе «Зимний город» на полигоне в подмосковном городе Дмитров;

– проведение натурных испытаний лабораторного макета АИ ТИС в сложных условиях видения при низкой прозрачности среды распространения оптического излучения совместно с ООО «Софт Кристалл» г. Томск.

#### **4.6 Выводы по главе 4**

Проведено экспериментальное исследование ММИД с использованием экспериментального макета АИ ТИС. Исследование ММИД проводилось для 20-ти локальных АЗВ в АИ ТИС при стробировании по фотокатоду без применения и с применением алгоритма коррекции нелинейности измерительной функции. Получены видеокadres, содержащие первую и суммарную АЗВ. Построены измерительные функции по дальности, графики ошибок линейности измерительной функции и «карты глубин» наблюдаемого пространства.

Для 20-ти зонного ММИД были получены следующие результаты. Среднеквадратическая ошибка измерительной функции по дальности до применения алгоритма коррекции нелинейности составила 0,2316 м. После коррекции среднеквадратическая ошибка составила 0,1227 м. Экспериментально подтверждена эффективность алгоритма коррекции нелинейности измерительной функции путем изменения длительности задержек для каждой из 20-ти локальных зон в ММИД.

Проведен эксперимент с измерением дальности до одиночного объекта, расположенного в поле зрения системы для 20-ти зонного ММИД без применения метода коррекции и с применением коррекции нелинейности измерительной функции. Эксперимент проводился с изменением дистанции от 8 до 20 м с шагом 2 м. По результатам данного эксперимента, также были получены калибровочные коэффициенты измерительной функции для 20-ти зонного ММИД. При этом, среднеквадратическая ошибка до применения алгоритма коррекции нелинейности для 20-ти зонного ММИД составила 0,165 м, а после коррекции среднеквадратическая ошибка линейности составила 0,065 м.

Представлены результаты экспериментального исследования влияния шума фотоприемника на точность измерения дальности для 100-зонного ММИД.

Приведены результаты испытания макета АИ ТИС и измерения им дальности на полигоне НИИ РТС ТУСУР. Представлены изображения некоторых объектов на полигоне и полученные с помощью АИ ТИС «карты глубин» наблюдаемого пространства.

Представлено описание испытания макета АИ ТИС в условиях пониженной прозрачности среды распространения оптического излучения проведенного в БАК Института оптики и атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН.

Результаты данной главы представлены в следующих работах автора [79, 80, 97, 102, 103].

## Заключение

Далее сформулированы основные результаты работы, подтверждающие достижение цели исследования по разработке методов прецизионного измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах (АИ ТИС).

1. Разработан и исследован многозонный метод измерения дальности (ММИД) для АИ ТИС.

2. Проведено компьютерное моделирование ММИД в АИ ТИС, которое подтверждает достоверность данного метода измерения дальности в АИ ТИС. При моделировании ММИД получены результаты для разного количества активных зон видения (АЗВ). При этом установлено, что при увеличении количества локальных АЗВ в ММИД абсолютная ошибка определения дальности уменьшается и достигает миллиметровой точности при количестве локальных АЗВ равным 10. Проведено моделирование влияния шума фотоприемника и нестабильности временных параметров ИПП и ИСФ в АИ ТИС.

3. Предложен способ повышения линейности измерительной функции в ММИД, позволяющий повысить точность измерения дальности до объектов в 2,5 раза.

4. Разработано программное обеспечение «Вычислитель активных зон видения томографических систем», позволяющее также производить моделирование ММИД и оценивать его характеристики точности при различных параметрах и формах ИПП и ИСФ АИ ТИС. На данную программу получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ (№ 2021610608).

5. Разработан блок формирования сигналов на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) для управления фотоприемником и устройством подсвета АИ ТИС. Особенностью разработанного блока управления является прецизионный шаг установки задержек и длительностей формируемых импульсов равный 100 пс.

6. Проведены натурные испытания ММИД с использованием предложенного алгоритма коррекции нелинейности и без него. При этом для ММИД

использующего 20 локальных активных зон видения (АЗВ) на трассе протяженностью от 8 м до 20 м среднеквадратическая ошибка измерения дальности составила 0,16 м, а с коррекцией линейности измерительной функции 0,06 м. Проведены экспериментальные исследования влияния шума фотоприемника с использованием макета АИ ТИС на точность измерения дальности в ММИД.

Таким образом, в диссертационной работе в соответствии с сформулированной целью содержится решение задач по разработке методов прецизионного измерения дальности в АИ ТИС, имеющих существенное значение для отрасли знаний фотоники и оптико-электронного приборостроения.

Рекомендации по использованию результатов исследования:

1. Для уменьшения влияния форм и стабильности временных параметров ИПП и ИСФ на точность измерения дальности в АИ ТИС рекомендуется использовать ММИД.

2. Для повышения точности измерения дальности в ММИД рекомендуется использовать алгоритм коррекции нелинейности измерительной функции путем внесения предискажений формы измерительной АЗВ в ММИД.

Дальнейшим развитием исследований в данном направлении является разработка методов и алгоритмов прецизионного измерения дальности в условиях низкой прозрачности среды распространения оптического излучения.

**Сокращения, обозначения, термины и определения**

АИ ТИС – активно-импульсная телевизионная измерительная система

АБГШ – аддитивный белый гауссов шум

АЗВ – активная зона видения

ДМИД – двухзонный метод измерения дальности

ИЛПИ – импульсный лазерный полупроводниковый излучатель

ИПП – импульс подсвета пространства

ИСФ – импульс стробирования фотоприемника

КМОП – комплементарная структура «металл-оксид-полупроводник»

МДП – металл-диэлектрик-полупроводник

МКП – микроканальная пластина

ММИД – многозонный метод измерения дальности

ПЗС – прибор с зарядовой связью

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

ПО – программное обеспечение

ПНВ – прибор ночного видения

ТС – телевизионная система

СКО – среднеквадратическое отклонение

ЭОП – электронно-оптический преобразователь

**Список использованных источников**

1. Волков, В.Г. Техническое зрение / В.Г. Волков, П.Д. Гиндин. – Инновации. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 840 с.
2. Гейхман, И.Л. Основы улучшения видимости в сложных условиях / И.Л. Гейхман, В.Г. Волков. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 286 с.
3. Волков, В.Г. Активно-импульсные приборы наблюдения / В.Г. Волков // Вопросы оборонной техники. – 1994. – Вып. 3-4 (142-143). – С. 18-25.
4. Волков, В.Г. Малогабаритные телевизионные системы. Обзор по материалам отечественной и зарубежной печати за 1980-2000 г. / В.Г. Волков // №5591. – М.: НТЦ «Информтехника», 2000. – 156 с.
5. Карасик, В.Е. Лазерные системы видения: учебное пособие / Карасик В.Е., Орлов В.М. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 352 с.
6. Kapustin, V., Movchan, A., Kuryachiy, M., & Chaldina, E. (2020, March). Active-pulse television measuring systems images space-time filtration by range. In: Journal of Physics: Conference Series, vol. 1488, p. 012032.
7. Белов, В.В. Активные ТВ-системы видения с селекцией фонов рассеяния / В.В. Белов и др. // Датчики и системы. – 2012. – №. 3. – С. 25.
8. Busck, J. & Heiselberg, H. (2004). Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar. Applied optics, 43(24), pp. 4705-4710.
9. Sun, H. Y., Guo, H. C., & Li, Y. C. (2009, August). Performance analysis of range-gated active imaging system. In International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Laser Sensing and Imaging (Vol. 7382, p. 73822E). International Society for Optics and Photonics.
10. Laurenzis, M., Christnacher, F., Monnin, D., & Zielenski, I. (2010, April). 3D range-gated imaging in scattering environments. In: Laser Radar Technology and Applications XV, vol. 7684, p. 768406.
11. Artamonov, S. I., Gryaznov, N.A., Kharlamov, V.V., Romanov, N.A., & Sosnov, E.N. (2017). Analytical Review of the Development of Laser Location Systems. In: Indian Journal of Science and Technology, 10 (15).

12. Wang, X., Cao, Y., Cui, W., Liu, X., Fan, S., Zhou, Y., & Li, Y. (2014, December). Three-dimensional range-gated flash LIDAR for land surface remote sensing. In *Land Surface Remote Sensing II* (Vol. 9260, p. 92604L). International Society for Optics and Photonics.
13. Gruber, T., Julca-Aguilar, F., Bijelic, M., & Heide, F. (2019). Gated2depth: Real-time dense lidar from gated images. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 1506-1516.
14. Baranov, P., Tsytsulin, A., Kurnikov, A., & Chrnogubov, A. (2019, October). 3D Imaging Method Based on CCD in the Ultra-Small Integration Time Mode. In: *2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*, pp. 0725-0728.
15. Amzajerjian, F., Roback, V. E., Bulyshev, A., Brewster, P. F., & Hines, G.D. (2016). Imaging flash lidar for autonomous safe landing and spacecraft proximity operation. In *AIAA SPACE 2016* (p. 5591).
16. Roback, V.E., Amzajerjian, F., Bulyshev, A., Brewster, P., & Barnes, B.W. (2016, May). 3D flash lidar performance in flight testing on the morpheus autonomous, rocket-propelled lander to a lunar-like hazard field. In: *Laser Radar Technology and Applications XXI*, vol. 9832, p. 983209.
17. Сергеев, В.А. Лидар / В.А. Сергеев, С.А. Микаева // Наука. Исследования. Практика. – 2020. – С. 165-166.
18. LiDAR-сканеры от Pepperl+Fuchs в автоматизации / ООО «Пепперл+Фукс Аутомейшн». – Журнал “ИСУП”. – № 2(86) . – 2020.
19. Chua, S.Y., Wang, X., Guo, N., Tan, C.S., Chai, T.Y., & Seet, G.L. (2016). Improving three-dimensional (3D) range gated reconstruction through time-of-flight (TOF) imaging analysis. In: *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, pp. 11.
20. Chua, S.Y., Chew, K.W., Guo, N., & Wang, X. (2018, April). Three-dimensional (3D) Reconstruction of Range Gated Imaging. In: *2018 IEEE 7th International Conference on Photonics (ICP)*, pp. 1-3.

21. Bonnier, D., & Larochelle, V. (1996, June). Range-gated active-imaging system for search-and-rescue and surveillance operations. In *Infrared technology and Applications XXII* (Vol. 2744, pp. 134-145). International Society for Optics and Photonics.

22. Kapustin, V.V., Movchan, A. K., Zaytseva, E. V., & Kuryachy, M. I. (2018). Active pulse television measuring systems for ensuring navigation of transport means in heavy weather conditions. *Transportation systems and technology*, 4(1), pp. 68-83.

23. Gorobets, V.A., Kabashnikov, V.P., Kuntsevich, B.F., Metelskaya, N.S., & Shabrov, D.V. (2016). Visibility Zone of Active-Pulse Vision Systems When Observing Along Inclined Paths. *Journal of Applied Spectroscopy*, 83(1), pp. 93-99.

24. Xinwei, W., Yan, Z., Songtao, F., Yuliang, L., & Hongjun, L. (2009). Echo Broadening Effect in Range-Gated Active Imaging Technique. In *Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*.

25. Капустин, В.В. Активно-импульсные телевизионные измерительные системы с повышенной устойчивостью к оптическим помехам: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 27.12.17 / Капустин Вячеслав Валериевич.– Томск, 2017 – 118 с.

26. Kapustin, V., Movchan, A., & Kuryachiy, M. (2017, June). Vision area parameters analysis for active-pulse television-computing systems. In *2017 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)* (pp. 1-5). IEEE.

27. 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.

28. Особенности построения оптических систем низкоуровневых телевизионных камер / В.В. Бузук, С.А. Вергилес, А.В. Гусаченко и др.// *Вестник СГГА - выпуск 7 – 2002. – С.152 – 156*.

29. Бегучев В.П. Электронно-оптические преобразователи. Состояние и тенденции развития / В.П. Бегучев А.М. Филачев, А.Л. Чапкевич // Прикладная физика. – 1999. – № 2. – С. 132 – 139.

30. Грузевич, Ю.К. Оптико-электронные приборы ночного видения / Ю.К. Грузевич – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 276 с.

31. Николаев, Д.Н. Электронно-оптические преобразователи. История развития и виды поколений / Д.Н. Николаев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2007. - №1(15) - С. 29 - 33.

32. Электронно-оптические преобразователи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://katodnv.com/ru/catalog> (дата обращения: 18.08.21 г.).

33. Волков, В.Г. Приборы ночного видения новых поколений / В.Г. Волков // Специальная техника. -2001.- №5.- С. 2 – 8.

34. Стробирование ICCD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dsioffe.narod.ru/articles/iccdgating/iccdgating.htm> (дата обращения: 18.08.21 г.).

35. Крутик, М.И. Многоканальные программно-управляемые электронно-оптические комплексы для скоростной регистрации серии изображений быстропротекающего процесса [Электронный ресурс] / М.И. Крутик // - Режим доступа: <http://www.videoscan.ru/page/711> (дата обращения: 18.08.21 г.).

36. Самойлов, Ф. Эволюция формирователей изображения на приборах с зарядовой связью / Ф. Самойлов // Техника кино и телевидения. – 1994. – №1. – С. 22 – 34.

37. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации / А.К. Цышулин //Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2014. - 272 с.

38. Ильин, А.А. Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков [Электронный ресурс] / А.А Ильин, А.М. Овчинников, М.Ю. Овчинников // – Режим доступа: [http://www.keldysh.ru/papers/2003/prep85/prep2003\\_85.html](http://www.keldysh.ru/papers/2003/prep85/prep2003_85.html), свободный (дата обращения: 18.08.21 г.).

39. Кирпиченко, Ю.Р. Видеоинформационные системы наблюдения и контроля при сложных условиях видимости / Ю.Р. Кирпиченко, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2(26). – Ч. 1. – С. 105–110.

40. Волков, В.Г. Лазерные полупроводниковые излучатели для приборов ночного видения / В.Г. Волков // Полупроводниковая светотехника. - 2012.- № 1.– С. 45 – 50.

41. Волков, В.Г. Светодиодные излучатели для приборов ночного видения / В.Г. Волков // Полупроводниковая светотехника. - 2011. - Т.3. - № 11. – С. 49 – 53.

42. Волков, В.Г. Светодиодные излучатели для телевизионных систем / В.Г. Волков // Полупроводниковая светотехника. – 2011.- Т.4. - № 12. – С. 54 – 59.

43. НПП НАНОСКАН: Продукция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nanoscan.su/catalog/active/> (дата обращения: 18.08.21 г.).

44. Системы ночного вождения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://katodnv.com/ru/catalog> (дата обращения: 18.08.21 г.).

45. Волков, В.Г. Твердотельные лазеры с накачкой мощными лазерными диодами, используемые в системах обеспечения безопасности/ В.Г. Волков // Системы управления, связи и безопасности. – 2016.– № 2 .– С. 142 – 181.

46. ARGС-2400 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.obzerv.com/products/land-systems/argc-2400> (дата обращения 18.08.21 г.)

47. Тарасов, В.В. Инфракрасные системы «смотрящего» типа / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков – М.: Логос, 2004. – 444 с.

48. Тарасов, В.В. Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход: Учебник / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков; под ред. Ю.Г. Якушенко. – М: Университетская книга, 2016. – 488 с.

49. Способ активно-импульсного видения [Текст]: патент РФ RU 2657292 С1 / Голицын А.А., Сейфи Н.А.; заявитель и патентообладатель ИФП СО РАН – заявка № 2017100286; заявл. 09.01.2017; опубл. 13.06.2018; Бюл. № 17.

50. Голицын, А.А. Активно-импульсный метод наблюдения с использованием ПЗС-фотоприемника со строчным переносом / А.А. Голицын, Н.А.

Сейфи // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. – 2017. – Т. 60. – № 11. – С. 1040–1047.

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

52. Голицын, А.А. Реализация активно-импульсного режима на ПЗС-матрице / А.А. Голицын, Н.А. Сейфи // Прикладная физика. – 2018. – № 1. – С. 78–83.

53. Портативный активно-импульсный прибор наблюдения / Д.В. Алантьев, А.А. Голицын, А.В. Голицын, Н.А. Сейфи // Изв. вузов. Приборостроение. - 2018. - Т. 61.- № 6. - С. 507—512.

54. CAT EYE [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lheritier-alcen.com/en/cat-eye> (дата обращения 18.08.21 г.).

55. BrightEye [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.brightwayvision.com/products/#brighteye-sample> (дата обращения 18.08.21 г.).

56. Нуре: Что такое ToF камера и зачем она нужна смартфону [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hype.ru/@ns3230/chto-takoe-tof-kamera-i-zachem-ona-nuzhna-smartfonu-eqn1iqxn> (дата обращения: 18.08.21 г.).

57. Hagebeuker, D. I. B., & Marketing, P. (2007). A 3D time of flight camera for object detection. PMD Technologies GmbH, Siegen, 2.

58. Klionovska, K., & Benninghoff, H. (2016). Visual navigation for rendezvous and docking using PMD camera. In International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM).

59. Gokturk, S. B., Yalcin, H., & Bamji, C. (2004, June). A time-of-flight depth sensor-system description, issues and solutions. In 2004 conference on computer vision and pattern recognition workshop (pp. 35-35). IEEE.

60. Niclass, C. L., Rochas, A., Besse, P. A., & Charbon, E. (2004, February). A CMOS single photon avalanche diode array for 3D imaging. In 2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference (IEEE Cat. No. 04CH37519) (pp. 120-517). IEEE.

61. Basler [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.baslerweb.com/en/sales-support/downloads/document-downloads/tof-cameras-in-logistics-robotics-and-medicine/>, свободный (дата обращения: 10.12.2021).

62. Волков, В.Г. Активно-импульсные ПНВ и тепловизионные приборы. Анализ возможности применения / В.Г. Волков // Фотоника. – 2007. - № 4. – С. 24 – 28.

63. В. М. Белоконев, М. А. Баюканский, В. Г. Волков, В. Л. Саликов, С. А. Украинский. Прикл. Физика. – 2007. № 5. С 127 – 129.

64. Дегтярев, П.А. Исследование и разработка устройств получения видеосигнала в активно-импульсной телевизионной системе наблюдения: дис. канд. тех. наук: 05.12.04 / Дегтярев Павел Алексеевич. – Томск, 2005. – 223 с.

65. Активно-импульсные системы видения и алгоритмы определения расстояний до объектов / В.А. Горобец // Журнал прикладной спектроскопии. – 2014. – Т. 81. – №. 2. – С. 283-291.

66. Kabashnikov, V., & Kuntsevich, B. (2017). Distance determination based on the delay time-intensity profile analysis in range-gated imaging. *Applied optics*, 56(30), 8378-8384.

67. Kabashnikov, V., & Kuntsevich, B. (2017, October). Method for distance determination using range-gated imaging suitable for an arbitrary pulse shape. In *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV* (Vol. 10433, p. 1043309). International Society for Optics and Photonics.

68. Göhler, B., & Lutzmann, P. (2010, October). Range accuracy of a gated-viewing system compared to a 3D flash LADAR under different turbulence conditions. In *Electro-Optical Remote Sensing, Photonic Technologies, and Applications IV* (Vol. 7835, p. 783504). International Society for Optics and Photonics.

69. Busck, J. (2005). Underwater 3-D optical imaging with a gated viewing laser radar. *Optical Engineering*, 44(11), 116001.

70. Göhler, B., & Lutzmann, P. (2013, October). Range accuracy of a Gated-Viewing system as a function of the gate shift step size. In *Electro-Optical Remote*

Sensing, Photonic Technologies, and Applications VII; and Military Applications in Hyperspectral Imaging and High Spatial Resolution Sensing (Vol. 8897, p. 889708). International Society for Optics and Photonics.

71. Andersen, J. F., Busck, J., & Heiselberg, H. (2013). Submillimeter 3-D laser radar for space shuttle tile inspection. Danisch Defense Research Establishment, Copenhagen, Denmark.

72. Xinwei, W., Yan, Z., Songtao, F., Jun, H., & Yuliang, L. (2011). Four-dimensional flash trajectory imaging using time-delay-modulated range-gated viewing. *Optics letters*, 36(3), 364-366.

73. Xinwei, W., Youfu, L., & Yan, Z. (2013). Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging. *Applied optics*, 52(30), 7399-7406.

74. Laurenzis, M., Christnacher, F., & Monnin, D. (2007). Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping. *Optics letters*, 32(21), 3146-3148.

75. Кабашников, В.П. Погрешность определения расстояний методами корреляции расстояние-интенсивность для прямоугольной формы импульса подсветки / В.П. Кабашников, Б.Ф. Кунцевич // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. - 85(4) – С. 645-651.

76. Xiuda, Z., Huimin, Y., & Yanbing, J. (2008). Pulse-shape-free method for long-range three-dimensional active imaging with high linear accuracy. *Optics letters*, 33(11), 1219-1221.

77. Jin, C., Sun, X., Zhao, Y., Zhang, Y., & Liu, L. (2009). Gain-modulated three-dimensional active imaging with depth-independent depth accuracy. *Optics Letters*, 34(22), 3550-3552.

78. Tian, Z., Yang, G., Zhang, Y., Cui, Z., & Bi, Z. (2021). A range-gated imaging flash Lidar based on the adjacent frame difference method. *Optics and Lasers in Engineering*, 141, 106558.

79. Movchan, A. K. et al. Multi-Area Range Measurement Method Using Active-Pulse Television Measuring Systems //2020 21st International Conference of Young

Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – IEEE, 2020. – pp. 293–297.

80. Мовчан А. К. Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности активно-импульсными телевизионными измерительными системами / Мовчан А.К., Капустин В.В., Курячий М.И., Чалдина Е.С. // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 7–14.

81. Movchan, A., Kapustin, V., Kuryachiy, M., & Chaldina, E. (2020). Statistical Analysis and Experimental Evaluation of Active-Pulse Television Measuring Systems Vision Zone Shapes. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1488, p. 012006).

82. Мовчан А.К. Статистический анализ и экспериментальная оценка форм зон видения активно-импульсных телевизионных измерительных систем / А.К. Мовчан, В.В. Капустин, М.И. Курячий, Е.С. Чалдина // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XV Международной научно-практической конференции (20–22 ноября 2019 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2019. – С. 188-192.

83. Movchan, A. K., Kapustin, V. V., Kuryachiy, M. I. (2018). Methods and means of tomographic vision of space by active-pulse television measurement systems. In *GraphiCon 2018-28th International Conference on Computer Graphics and Vision* (pp. 222-225).

84. Movchan, A.K. Study of the Time-of-Flight Method for Measuring Distances to Objects Using an Active-Pulse Television Measuring System / E.S. Chaldina, Movchan A.K., Kapustin V.V. – 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), 2019.

85. Конюхов А.Л. Критерии оценки отношения сигнал/шум в активно-импульсных телевизионно-вычислительных системах / А.Л. Конюхов, А.Г. Костевич, М.И. Курячий // Доклады Томск. гос. университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2(26). – Ч. 1. – С. 111–115.

86. Кирпиченко, Ю.Р. Исследование влияния режимов питания ЭОП на динамический диапазон активно-импульсной телевизионной системы / Ю.Р. Кирпиченко // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 2(26). – Ч. 1. – С. 100–104.

87. Гурский, Е.И. Теория вероятностей с элементами математической статистики: учебное пособие для втузов / Е.И. Гурский. – М: «Высшая школа», 1971. – 328 с.

88. Королев, А.С. Влияние джиттера на работу современных высокоскоростных цифровых устройств обработки сигналов // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2015. – №. 8 (91).

89. Агеева, Н.Н. Математический алгоритм устранения джиттера при измерении с помощью электронно-оптических камер усредненной хронограммы пикосекундного импульса света / Н.Н. Агеева, И.Л. Бронева, Д.Н. Забегаев, А.Н. Кривонос // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – №. 11. – С. 12.

90. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021612745 Российская Федерация. Вычислитель активных зон видения томографических систем / Е.С. Чалдина, А.К. Мовчан, В.В. Капустин; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2021612745; заявл. 27.01.2020; опубл. 24.02.2021. – 1 с.

91. Movchan, A. et al. Software tool for modelling active vision areas of tomographic systems // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1862. – №. 1. – p. 012015.

92. Чалдина, Е.С. Программная среда для проведения лабораторного практикума «Моделирование активных зон видения активно-импульсных телевизионных измерительных систем» / Е.С. Чалдина // Межд. научно-методич. конференция (НМК – 2020) «Современные тенденции развития непрерывного образования: вызовы цифровой экономики», 31 января 2020 г. – Томск: Изд-во ТУСУРа, 2020. – С. 104-105.

93. Мовчан А.К. Вычислитель активных зон видения томографических систем / Е.С. Чалдина, А.К. Мовчан, В.В. Капустин, М.И. Курячий, // Электронные средства и системы управления: материалы докладов XVI Международной научно-

практической конференции (18–20 ноября 2020 г.): в 2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектр, 2020. – С. 169-172.

94. Высокоуровневый язык технических расчетов MATLAB [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://matlab.ru/products/matlab> (дата обращения: 2.03.2020).

95. Braesicke, K., Wegner, D., & Repasi, E. (2017, May). Workbench for the computer simulation of underwater gated viewing systems. In: Ocean Sensing and Monitoring IX, vol. 10186, p. 101860B.

96. Мовчан, А.К. Анализ особенностей изображений активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем / В.В. Капустин, А.К. Мовчан, М.И. Курячий // Материалы международной научно-технической конференции «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации «Распознавание - 2017». Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2017. – С. 188-190.

97. Мовчан А. К. Блок управления активно-импульсных телевизионных систем / А. К. Мовчан [и др.] // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 16–20.

98. Мовчан, А. К., Капустин, В. В., Курячий, М. И. (2018). Оценка дальности до наблюдаемых объектов активно-импульсными телевизионными измерительными системами. Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации. Распознавание-2018 С. 175-177.

99. Казанцев Г.Д. Измерительное телевидения: учебное пособие для вузов / Г.Д. Казанцев, М.И. Курячий, И.Н. Пустынский. – М.: Высшая школа, 1994. – 288 с.

100. Кузьмичев, Д.А. Автоматизация экспериментальных исследований: Учебное пособие для вузов / Д. А. Кузьмичев, И. А. Радкевич, А. Д. Смирнов. - М. : Наука, 1983. - 391 с.

101. Мовчан, А.К. Капустин, В.В. Айсабек, С.А. Оценка отношения сигнал/помеха обратного рассеяния в активно-импульсных телевизионных вычислительных системах / А.К. Мовчан, В.В. Капустин, С.А. Айсабек // Межд.

науч. -практ. конф. «Электронные средства и системы управления». – 2018. В 2 ч. – Ч. 2. – С. 177–180.

102. Movchan, A. K., Belov, V. V., Gridnev, Y. V., Kapustin, V. V., Kudryavtsev, A. N., Kuryachii, M. I., ... & Shmargunov, V. P. (2019). Experimental Estimation of Frequency-Contrast Characteristics of Active Pulsed Television Systems under Conditions of Enhanced Turbidity of Aerosol Media. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 32(1), pp.103-107.

103. Мовчан А. К., Белов В. В., Гриднев Ю. В., Капустин В. В., Козлов В. С., Кудрявцев А. Н., Курячий М. И., Рахимов Р. Ф., Панченко М. В., Шмаргунов В. П. Экспериментальная оценка частотно-контрастных характеристик активно-импульсных телевизионных систем видения в условиях повышенной мутности аэрозольных сред. // *Оптика атмосферы и океана*. 2018. Т. 31. № 09. – С. 771–775.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

## КОПИИ ДОКУМЕНТОВ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021612745

## Вычислитель активных зон видения томографических систем

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (RU)*

Авторы: *Чалдина Елизавета Сергеевна (RU), Мовчан Андрей (KZ), Капустин Вячеслав Валериевич (RU)*

Заявка № 2021610608

Дата поступления 27 января 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 февраля 2021 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
**(обязательное)**  
**КОПИИ ДОКУМЕНТОВ**

СОГЛАСОВАНО

Директор НИИ РТС ТУСУР

  
В.Ю.Лебедев  
19 октября 2021 г.



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и инновациям ТУСУР

  
А. Г. Лошилов  
20 10 2021 г.

**АКТ**

**комплексных испытаний активно-импульсной телевизионной  
измерительной системы (АИ ТИС) и системы построения  
ортофотопланов местности беспилотным воздушным судном  
(СПОМБВС)**

*Время проведения испытаний: сентябрь-октябрь 2021 г.*

*Состав сотрудников, проводивших испытания (выполняемые ими функции):*

- 1) Крутиков М. В., с.н.с. НИИ РТС ТУСУР (обеспечение условий для проведения испытаний);
- 2) Курячий М. И., с.н.с. лаборатории ТА кафедры ТУ ТУСУР (планирование эксперимента и анализ полученных данных);
- 3) Капустин В. В., зав. лабораторией ТА кафедры ТУ ТУСУР (проведение эксперимента и анализ полученных данных с АИ ТИС);
- 4) Захлебин А. С., м.н.с. лаборатории ТА кафедры ТУ ТУСУР (проведение эксперимента и обработка полученных данных от СПОМБВС);
- 5) Мовчан А. К., м.н.с. лаборатории ТА кафедры ТУ ТУСУР (проведение эксперимента и обработка полученных данных с АИ ТИС).

*Цель испытаний:*

1. Экспериментальное исследование экспериментального макета АИ ТИС в полевых условиях с оценкой точности измерения дальности до объектов.
2. Экспериментальное исследование СПОМБВС в полевых условиях с оценкой точности построения ортофотоплана местности.
3. Сравнительная оценка результатов измерений дальности до объектов АИ ТИС и СПОМБВС.

*Программа испытаний:*

2. Проведение авиационных работ на БВС с целью получения аэрофотоснимков.
3. Камеральная обработка полученных материалов.
4. Установка на позицию первой «реперной точки» макета АИ ТИС.
5. Установка транспарантов в следующие за первой позицией «реперных точек».
6. Измерение расстояний между первой реперной точкой (позиция АИ ТИС) и каждой из следующих реперных точек (позиции транспарантов) лазерным дальномером.
7. Видеосъёмка транспарантов АИ ТИС.
8. Обработка полученных видеоданных и построение «карты глубин».

*Место проведения испытаний:*

Полигон НИИ РТС ТУСУР.

*Состав используемой аппаратуры:*

1. БВС вертолетного типа DJI Phantom 4 Pro с интегрированным геодезическим приемником AGNSS L1/L2.
2. Геодезический ГНСС приемник Trimble R8.
3. Геодезическая ГНСС базовая станция Trimble R7.
4. Экспериментальный макет АИ ТИС.
5. Персональный компьютер (ноутбук).
6. Лазерный дальномер Bosch DLE 50.

*Условия проведения испытаний:*

Испытания производились в полевых условиях. Исследование СПОМБВС производилось в дневное время суток. Исследование АИ ТИС производилось в вечернее время суток.

*Порядок проведения испытаний:*

1. Экспериментальное исследование СПОМБВС.

- 1.1 Подготовка видеокамеры.

Перед полетом производилось форматирование карты памяти видеокамеры БВС. Далее производилась настройка резкости видеокамеры. БВС поднимался на рабочую высоту, после чего производилась настройка фокуса видеокамеры и его фиксация. Настройка резкости производилась путем извлечения карты памяти и последующей проверкой качества полученного изображения. После проверки качества изображения карта памяти устанавливалась на БВС.

- 1.2 Установка наземных геодезических приемников.

Для работы использовался геодезический приемник Trimble R7 (GPS/ГЛОНАСС, двухчастотный, запись 5 раз в секунду). Приемник устанавливался на места выбранных «реперных точек». Место установки приемника должно быть открытым и не перекрывать связь со спутниками. Приемник в каждой реперной точке должен установить связь не менее чем с 12 спутниками.

### 1.3 Настройка бортового приемника.

Бортовой приемник (AGNSS L1/L2, GPS/ГЛОНАСС, двухчастотный, запись 5 раз в секунду). Полет осуществляется только в условиях, если бортовой приемник устанавливал связь не менее чем с 12 спутниками.

### 1.4 Подготовка БВС к запуску.

Для принятия решения о запуске БВС проверялись следующие параметры:

- наземная скорость ветра – не более 7 м/с;
- воздушная скорость ветра - до 10 м/с;
- освещенность – ясно, облачность, переменная облачность, без осадков, пасмурная погода;

- геодезические приемники – установлены в соответствии с описанной выше процедурой;

- оборудование исправно работает: БВС прошел предполетное тестирование и осмотр, фотокамера настроена, имеется устойчивая связь с пультом управления БВС, полетный маршрут загружен, выполненная проверка связи на всем маршруте полета;

Управление в полете. Весь полет контролируется оператором БВС, который следит за показаниями приборов и, в случае необходимости, (сильный ветер, необходимость изменения высоты, потеря связи, исполнение требований диспетчерских служб, недостаточная освещенность и т.д.) принимает решения о коррекции параметров полета и видеосъемки.

## 2. Экспериментальное исследование АИ ТИС.

Первым этапом производилась точная установка макета АИ ТИС на позицию первого, ранее скоординированного геодезическим приемником «репера». Далее производилось включение системы. Осуществлялась настройка резкости и диафрагмы объектива системы. производилась настройка режима измерения дальности, относительно получаемого с системы изображения транспарантов, ранее установленных на местах, скоординированных «реперных точек». После чего осуществлялась коррекция настройки диафрагмы и резкости объектива. Далее осуществлялась запись в память персонального компьютера полученных

системой видеоданных, содержащих изображения наблюдаемого пространства. На персональном компьютере производилась обработка полученных видеоданных, построение «карты глубин» наблюдаемого пространства и дальнейшее измерение расстояния от макета АИ ТИС до каждого из транспарантов. В ходе испытаний были измерены с помощью лазерного дальномера расстояния между системой и каждым из транспарантов.

*Результаты испытаний:*

1. Результаты испытаний СПОМБВС.

В результате проведения испытаний СПОМБВС был получен видеоряд из аэрофотоснимков и данные спутниковых наблюдений с геодезических приборов. После фотограмметрической обработки полученных материалов был построен ортофотоплан местности с пространственным разрешением 2,4 см на пиксель. Ошибка определения координат центров «реперных точек» по ортофотоплану местности приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Ошибка на контрольных точках («реперах»)

Обозначение «репера»	Ошибка X, см	Ошибка Y, см
R1	-4,03	6,04
R2	-5,11	4,39
R3	-2,83	5,17
R4	-2,95	4,94
R5	-2,05	6,74

Расстояния, измеренные между «реперами» по построенному ортофотоплану местности, а также с помощью геодезического приемника, и разность их измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результат измерения расстояний между «реперами»

Интервал	Расстояние по ортофотоплану, м	Расстояние по геодезическому прибору, м	Разница расстояний, м
R1-R2	10,93	10,94	0,01
R1-R3	18,93	18,95	0,02
R1-R4	34,73	34,71	0,02
R1-R5	39,72	39,74	0,02

## 2. Результаты испытаний АИ ТИС.

В таблице 3 представлены результаты измерений расстояний до транспарантов макетом АИ ТИС и лазерным дальномером.

Таблица 3 – Результат измерения расстояний до транспарантов («реперов»)

Объект измерения	Средство измерения		Разность измерений АИ ТИС и лазерного дальномера, м
	АИ ТИС, м	Лазерный дальномер, м	
Транспарант 1 (R2)	11,12	11,00	+0,12
Транспарант 2 (R3)	18,5	19,06	+0,12
Транспарант 3 (R4)	34,78	34,97	-0,19
Транспарант 4 (R5)	39,62	39,95	-0,33

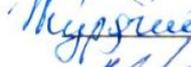
### Выводы:

1. Испытания СПОМБВС показали, что используемый в данном случае метод построения ортофотоплана местности имеет сантиметровую точность определения координат объектов на рассматриваемой местности по сравнению с образцовым геодезическим прибором.

2. Испытания АИ ТИС показали, что используемый в данной системе метод измерения дальности до объектов наблюдения и построения «карты глубин» имеет дециметровую точность измерения расстояний до объектов на рассматриваемой трассе, по сравнению с образцовым лазерным дальномером, имеющим миллиметровую точность измерения расстояний, который может считаться эталонным.

3. В общем случае проведенные комплексные испытания АИ ТИС и СПОМБВС показали состоятельность методик измерения координат и дальностей до объектов рассматриваемыми средствами.

### Участники испытаний

 М. В. Крутиков  
 М. И. Курячий  
 В. В. Капустин  
 А. С. Захлебин  
 А. К. Мовчан



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и  
инновациям ТУСУР

к.т.н., доцент

А.Г. Лошилов

« 19 » 10 2021 г.

### АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

результатов диссертационной работы

Мовчана Андрея Кирилловича

Мы, нижеподписавшиеся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ) ТУСУР, доктор технических наук, старший научный сотрудник Газизов Т.Р. и руководитель проекта РФФИ «Прецизионное томографическое видение объектов телевизионными измерительными системами с активно-импульсным подсветом пространства» (номер проекта 19-37-90141), кандидат технических наук, доцент Курячий М.И. настоящим актом подтверждаем, что в указанном проекте использованы следующие результаты диссертационной работы Мовчана А.К.

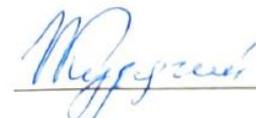
1. Программный модуль «Вычислитель активных зон видения томографических систем».
2. Результаты компьютерного моделирования многозонного метода измерения дальности в активно-импульсных телевизионных измерительных системах.
3. Результаты натуральных испытаний многозонного метода измерения дальности в экспериментальном макете активно-импульсной телевизионной измерительной системы.

Использование данных результатов способствовало успешному завершению проекта.

Заведующий кафедрой ТУ

 Т.Р. Газизов

Руководитель проекта

 М.И. Курячий



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и  
инновациям ТУСУР

к.т.н., доцент

А.Г. Лошилов

« 19 » 10

2021 г.

## АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

результатов диссертационной работы

Мовчана Андрея Кирилловича

Я, нижеподписавшийся, заведующий кафедрой телевидения и управления (ТУ) ТУСУР, доктор технических наук, старший научный сотрудник Газизов Т.Р., руководитель проекта, выполняемого в рамках базовой части государственного задания по НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» (шифр проекта 8.9562.2017/БЧ), подтверждаю, что в указанном проекте использованы следующие результаты диссертационной работы Мовчана А.К.

1. Экспериментальное оборудование, включающее в себя макет АИ ТИС и блок управления макетом для проведения натуральных испытаний в условиях нормальной и пониженной прозрачности среды распространения.
2. База изображений АИ ТИС, полученных в условиях нормальной и пониженной прозрачности среды распространения (дым, туман) в различных режимах работы системы.
3. Результаты натуральных испытаний макета активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) в большой аэрозольной камере в условиях нормальной и пониженной прозрачности среды распространения.

Использование данных результатов способствовало успешному завершению проекта.

Заведующий кафедрой ТУ,  
руководитель проекта

Т.Р. Газизов

**ООО «ИНТЭК»**

ИНН/КПП 7017236286/701701001

634041, г. Томск, ул. Красноармейская 96

**АКТ****использования результатов диссертационной работы Мовчана Андрея Кирилловича  
на тему «Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности в активно-  
импульсных телевизионных измерительных системах»**

В ноябре 2019 г. с целью проведения натурных испытаний, разработанный на кафедре телевидения и управления ТУСУР при активном участии А.К. Мовчана, лабораторный макет активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) был установлен на беспилотный автомобиль (разработанный силами Альянса "Техническое зрение" в городе Томске), который в декабре 2019 г. принял участие в конкурсе «Зимний город» на полигоне в подмосковном городе Дмитров.

Результатами испытаний являются.

1. Исследование контраста изображений при различных соотношениях длительностей импульсов оптического стробирования фотоприемного устройства и импульсов источника подсвета на различных дальностях наблюдения тестовых объектов.
2. Определение оптимального угла поля зрения и динамического диапазона измерения дальности АИ ТИС смонтированной на автомобиле.
3. Экспериментально полученные изображения и методика их статистической обработки позволит в дальнейшем выполнить исследование и разработку перспективного класса активно-импульсных телевизионных систем с повышенными качественными характеристиками по точности измерения дальности до объектов наблюдения.

Директор ООО «ИНТЭК»



Н. В. Калиновский

**АКТ**  
**использования результатов диссертационной работы Мовчана Андрея Кирилловича**  
**на тему «Методы и алгоритмы прецизионного измерения дальности в активно-**  
**импульсных телевизионных измерительных системах»**

В ноябре 2020 г. с целью проведения натурных испытаний, разработанный на кафедре телевидения и управления ТУСУР при активном участии А.К. Мовчана, экспериментальный макет активно-импульсной телевизионной измерительной системы (АИ ТИС) был испытан в сложных условиях видения при низкой прозрачности среды распространения оптического излучения.

Результатами испытаний являются.

1. Получение видеоданных с макета АИ ТИС в сложных условиях видения в задымленной среде.
2. Определение основных параметров формирования изображений АИ ТИС для измерения дальности в сложных условиях видения.
3. Определение энергетических параметров устройства подсвета АИ ТИС для реализации методов измерения дальности в сложных условиях видения.

Полученные изображения и результаты их обработки позволят в дальнейшем выполнять разработку перспективного класса активно-импульсных телевизионных систем для измерения дальности в сложных условиях видения.

Директор ООО «Софт-кристалл»



А.Л.Шум