

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление»  
Российской академии наук

На правах рукописи



УДК 004.932

Лопатина Вероника Вячеславовна

**Разработка алгоритмического аппарата  
высокоточного определения положения объектов  
относительно стационарной базы  
методами компьютерного зрения**

1.2.1 - Искусственный интеллект и машинное обучение

ДИССЕРТАЦИЯ  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

д. ф.-м. н., проф. Цурков В. И.

Москва – 2025

## Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Разработка системы высокоточного определения положения объектов....	11
1.1 Высокоточное определение положения объектов относительно стационарной базы с применением оптических измерителей .....	11
1.1.1 Высокоточное позиционирование морского крупнотоннажного судна относительно причала .....	12
1.1.2 Высокоточное позиционирование транспортных средств с применением оптических измерителей .....	18
1.2 Модель измерительного комплекса на основе оптических измерителей .....	21
1.2.1 Требования к характеристикам лазерного дальномера .....	25
1.2.2 Требования к характеристикам камеры компьютерного зрения .....	26
1.2.3 Требования к характеристикам компьютера оптического измерителя.....	27
1.3 Настройка совместной работы камеры и лазерного дальномера.....	28
1.3.1 Порядок использования. Штатный режим работы.....	28
1.3.2 Особенности юстировки элементов измерительного комплекса .....	29
Глава 2. Разработка метода идентификации крупногабаритного площадного объекта в кадре .....	31
2.1 Метод определения движения в кадре.....	32
2.2 Метод выбора объектов отслеживания.....	39
2.3 Обсуждение результатов .....	48
Глава 3. Разработка метода отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту .....	50
3.1 Метод отслеживания объектов .....	50
3.1.1 Создание первичной обучающей выборки данных и первичной модели...57	57
3.1.2 Предсказание искомого значения: отслеживание объекта.....	64
3.1.3 Дообучение модели: дополнение компонент фильтр-функции.....	66
3.1.4 Математическое описание метода машинного обучения.....	68
3.2 Условия на границах изображения.....	70
3.3 Обсуждение результатов .....	71

Глава 4. Разработка методики мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта.....	77
4.1 Метод определения продольного и вертикального смещения.....	80
4.1.1 Метод вычислений на основе формулы тонкой линзы.....	80
4.1.2 Метод вычислений на основе формулы тангенса .....	82
4.2 Фильтрация данных .....	86
4.2.1 Модель объекта наблюдения и описание свойств измерителя.....	89
4.2.2 Математическое описание метода машинного обучения.....	93
4.3 Анализ траекторий.....	95
4.3.1 Определение характера движения .....	95
4.3.2 Метаматематическое описание метода машинного обучения.....	96
4.3.3 Сопоставление разности величин смещения отслеживаемых объектов.....	97
4.4 Построение трёхмерной траектории движения методом машинного обучения .....	100
4.5 Определение скорости смещения.....	103
4.6 Обсуждение результатов .....	104
Заключение .....	106
Список литературы .....	111
Приложение А. Методика стендовых испытаний .....	117
1. Общие положения .....	117
2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний.....	119
3. Определяемые показатели.....	123
4. Методы испытаний .....	125
Приложение Б. Методика натурных испытаний.....	135
1. Общие положения .....	135
2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний.....	137
3. Определяемые показатели.....	140
4. Методы испытаний .....	142

## Введение

При внедрении автономного транспорта автоматизацию сбора данных об окружающей транспортное средство среде выполняют, используя принцип функциональной эквивалентности: сенсорная система автономного транспортного комплекса не должна уступать по своим возможностям сенсорным системам человека [1, 2].

Важнейшая сенсорная система человека – зрительная. С помощью зрительной системы человек получает большую часть информации об окружающем мире [3]. Зрение позволяет воспринимать свет, различать его яркость, адаптироваться к различным уровням освещённости, различать цвета и их оттенки, отличать объекты от фона и распознавать их, определять расположение объектов в пространстве и следить за их перемещением [4, 5].

Система компьютерного зрения позволяет воспроизводить часть функций зрительной системы человека: сегментации изображений, обнаружения объектов, слежения за объектами, восстановления и дополнения изображений, определения движения [6, 7]. В некоторых случаях компьютерное зрение превосходит человеческое, например, работа в спектральных диапазонах, которые не воспринимаются человеческим глазом (инфракрасный диапазон или ультрафиолетовый) [8].

Использование компьютерного зрения для анализа окружающей обстановки позволит обеспечить автономную транспортную систему данными для автоматического принятия решений и выполнения действий без участия человека или с его минимальным участием.

Автономная транспортная система может предполагать различные уровни участия человека:

1 уровень: система анализирует окружающую обстановку, принимает решение и предлагает действие, которое выполняет человек.

2 уровень: система анализирует окружающую обстановку, принимает решение и выполняет действие, которое контролирует человек в непосредственной близости.

3 уровень: система анализирует окружающую обстановку, принимает решение и выполняет действие, которое удалённо контролирует человек.

4 уровень: система анализирует окружающую обстановку, принимает решение и выполняет действие без контроля человека.

Для безопасной эксплуатации автономной транспортной системы, необходимо оперативно получать и анализировать информацию о текущей обстановке: положение транспортного средства в пространстве, наличие других транспортных средств или крупногабаритных объектов поблизости [9].

**Целью работы** является разработка алгоритмического аппарата высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы методами компьютерного зрения и машинного обучения.

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

- Разработка структуры программно-аппаратного комплекса высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы.
- Разработка метода определения движения в кадре и идентификации крупногабаритного площадного объекта.
- Разработка метода выбора объектов отслеживания.
- Исследование методов отслеживания объектов в видеопотоке.
- Разработка метода отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту.
- Исследование методов фильтрации данных.
- Разработка методики мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта.
- Разработка методик стендовых и натурных испытаний программно-аппаратного комплекса высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы.

**Областью исследования** являются методы, алгоритмы и создание систем машинного обучения для обработки и анализа изображений.

**Методы исследования.** Исследование проводилось с применением методов наблюдения, сравнения, эксперимента и измерения. При разработке алгоритмов применены методы машинного обучения, цифровой обработки изображений, обработки экспериментальных данных и математического анализа.

**Актуальность работы.** Определение пространственных характеристик объекта по данным оптических наблюдений многие годы является актуальной задачей науки и техники. Большинство технологий позволяющие определять положение объекта относительно некоторой точки отсчета появились и развевались параллельно. G. Lippmann (1908) [10] предложил способ регистрации светового поля с помощью микролинзового растра, что позволило получить многоракурсное объёмное изображение. А. А. Гершуном (1936) [11] были описаны радиометрические свойства света в трёхмерном пространстве. Е. Н. Adelson и J. Y. A. Wang (1992) [12] расположили микролинзовый растр в фокальной плоскости объектива, фиксируя двумерный массив световых лучей. Камера получила название пленоптической (plenoptic), а технология регистрации светового поля (Light Field) позволила получать стереопары используя только один объектив.

Широко применяемым в сфере компьютерного зрения способом представления объемной информации стало построение карты глубины по стереоизображениям, полученным с двух камер, расположенных рядом. Внесли

вклад в область компьютерной обработки стереоизображений работы W. D. Wright (1954) [13], J. B. Lerman (1970) [14], S.T. Barnard и W. B. Thompson (1980) [15]. H. Baker и T. Binford (1981) [16] провели исследования по определению расстояния до поверхностей объектов сцены от точки наблюдения.

Массовое распространение получила технология структурированного света или светового сечения. Работы по определению расстояния до поверхностей объектов сцены путём регистрации интерференционных полос были проведены в том числе C. A. Rosen (1979) [17], B. Girod и S. Scherock (1990) [18], G. Frankowski, M. Chen, T. Huth (2000) [19].

Использование в совокупности с камерой внешних источников подсветки с целью измерения времени прохождения светового импульса до объектов сцены положили начало технологии измерения задержки отражённого света (ToF - time-of-flight). Работы, например, R. J. Nickles и H. O. Meyer (1976) [20], N. A. Mullani, J. Markha, M. M. Ter-Pogossian (1980) [21], О. Н. Солощев, В. И. Слюсар, В. В. Твердохлебов (2007) [22].

Использование в качестве источника светового импульса луча лазера положило начало технологии обнаружения и определение дальности с помощью света (LiDaR - Light Identification Detection and Ranging). Работы R. T. H. Collis (1969) [23], A. Hauchecorne, M. L. Chanin (1980) [24], H. E. Poole, J. W. Cox, R. H. Couch, W. H. Fuller Jr. (1986) [25], Н. Г. Басов, Ю. Л. Кокурин (1986) [26], Н. И. Георгиев, Р. Нойберт, С. К. Татевян, К. А. Хайретдинов (1989) [27], Z. Pusztai, L. Hajder (2017) [28], А. О. Исмагилов, А. А. Калиничев (2025) [29].

Известны технические решения, предполагающие совместное использование лазерного дальномера и камеры. Например, адаптивный лазерный дальномер АТЛД-12 производства ОАО «ГРПЗ» позволяет выводить дальности до объекта поверх изображения телевизионной камеры; устройство A30TIR-50 производства Mugin UAV (Китай) включающее лазерный дальномер и EO/IR-камеру, позволяет с помощью компьютерного зрения выделять отдельный объекты, а также определять примерную дистанцию до объектов (устройство устанавливается на БПЛА).

Перечисленные технологии нашли широкое применение в различных областях: кинематограф, военное дело, автономный транспорт, промышленность. Каждая технология имеет ряд ограничений на условия эксплуатации. Например, технология структурированного света не пригодна для использования в условиях естественного освещения, так как использует инфракрасную подсветку. Построение карты глубины по стереоизображениям требует значительных вычислительных ресурсов аппаратного обеспечения для обработки данных [30], а это значит, что в комплексах, работающих в режиме реального времени стереопары для получения глубины не применимы. Лидары имеют низкое качество данных при измерении пространственных характеристик объектов, находящихся в неоднородных средах

(например, объект на воде при волнении). Пленоптика также требует ресурсоёмкой обработки за счёт совмещения группы смешённых изображений одной сцены [31].

Настоящая работа даёт продолжение задаче определения пространственных характеристик объекта по данным оптических наблюдений.

В общем случае задача определения положения методом компьютерного зрения требует решения отдельных подзадач, включая создание изображения, связанного с измеряемыми параметрами объекта; определение координат элементов изображения, обработка данных элементов изображения с целью определения необходимых параметров объекта.

Практическая необходимость исследований обусловлена необходимостью применения высокоточных систем позиционирования и высокоточных систем проводки для автономного водного, автодорожного, воздушного и железнодорожного транспорта. Например, швартовка судна, парковка и контроль стоянки грузового автомобиля относительно складского грузового терминала, контроль ж/д вагона на ж/д терминале, сцепка ж/д вагонов.

Высокоточные системы проводки и позиционирования используются для стабилизации положения подвижных объектов в различных транспортных системах, для обеспечения контроля положения и, как следствие, повышения безопасности. Повышение безопасности эксплуатации транспортной системы позволяет повысить интенсивность транспортного потока и пропускную способность транспортной сети, что повышает экономическую эффективность транспортной отрасли [32, 33].

Методы высокоточного определения положения пространственно-распределённого объекта относительно стационарной базы применимы не только на транспорте, но и в промышленности. Например, при сцепке деталей, когда точность совмещения деталей влияет на прочность, герметичность и надёжность функционирования промышленного изделия [34, 35, 36]. Одна деталь – база, другая – распределённый пространственный объект, который нужно расположить относительно базы, обеспечив минимальное усилие или минимальную нагрузку на элементы конструкции в процессе совмещения деталей.

Разработанные методы определения положения объектов относительно стационарной базы иллюстрируются на примере из морской транспортной отрасли. Методы определения положения объектов могут применяться для мониторинга швартовных операций, погрузки и выгрузки судна, анализа окружающей обстановки с борта судна, мониторинга стоянки судна.

Конкретными задачами, требующими отслеживания объекта по его фрагменту методами компьютерного зрения при автоматизации процессов в морской зоне порта, являются: отслеживание ориентации судна относительно причала во время швартовки и стоянки, мониторинг погрузки, анализ окружающей обстановки с борта судна. Эти задачи сводятся к отслеживанию смещения крупногабаритного

площадного объекта на изображениях по его наблюдаемому фрагменту. Разработке этих методов и посвящена настоящая работа.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Структура программно-аппаратного комплекса высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы.
2. Метод определения движения в кадре и идентификации крупногабаритного площадного объекта.
3. Метод выбора объектов отслеживания.
4. Метод отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту.
5. Методика мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта.

**Научная новизна.** В работе представлена структура программно-аппаратного комплекса на базе оптических измерителей для высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы. В отличие от предыдущего уровня техники, позволяющего измерять с помощью лазерных дальномеров только величины поперечного смещения объекта, измерительный комплекс позволяет в дополнение к поперечному смещению одновременно измерять продольное и вертикальное смещения объекта методами компьютерного зрения, что даёт возможность осуществлять мониторинг перемещения крупногабаритного объекта в трёхмерном пространстве.

В работе получены новые методы компьютерного зрения и машинного обучения, составляющие основу алгоритмического аппарата оптических измерителей. Разработанные методы позволяют воспроизводить некоторые функции человека (зрительной системы): сегментацию изображений, обнаружение объектов, сопровождение объектов, восстановление и дополнение изображений, обнаружение движения.

Метод определения движения в кадре и идентификации крупногабаритного площадного объекта. В отличии от известных методов, предложенный метод позволяет определять области изображения с постоянным движением и исключать случайно попавшие в кадр подвижные объекты, что делает его применимым в условиях автономной работы оптических измерителей в режиме реального времени.

Метод выбора объектов отслеживания. Метод является новым и позволяет повысить качество отслеживания объектов частотными методами за счёт определения характеристик объектов (участков изображения), которые прослеживаются в амплитудно-частотном спектре.

Метод отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту. В отличие от аналогов, применительно к задаче

отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту, метод устойчив к частичному перекрытию объекта (сохраняет качество отслеживания), выходу объекта за границы изображения, повороту и изменению масштаба объекта.

Методика мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта. Методика является новой и позволяет осуществлять мониторинг крупногабаритных площадных объектов с учётом характера их движения. В методике определены: порядок фильтрации данных для задачи мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта, физическая модель измеряемого крупногабаритного площадного объекта, метод расчёта ошибки измерений, порядок классификации движения объектов в кадре методом машинного обучения в соответствии с заданными классами движения.

### **Теоретическая значимость:**

- разработанный способ высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы методами компьютерного зрения и машинного обучения позволяет осуществлять мониторинг перемещения крупногабаритного объекта в трёхмерном пространстве с помощью оптических измерителей;
- полученные новые методы компьютерного зрения и машинного обучения, позволяют выполнять сегментацию изображений, обнаружение объектов, сопровождение объектов, восстановление и дополнение изображений, обнаружение движения;
- разработанная методика мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта позволяет осуществлять мониторинг объектов с учётом характера их движения.

### **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы:

- при создании автономных систем, в том числе, когда система анализирует окружающую обстановку, принимает решение и выполняет действие без контроля человека или с его минимальным участием;
- в промышленности, когда необходимо с высокой точностью позиционировать крупногабаритный объект, например, при токарной обработке поверхностей катания колесных пар вагонов или паровозов без выкатки тележек на специальных токарных станках;
- в транспортной отрасли, в процессе мониторинга и анализа окружающей обстановки с борта судна (морской и речной транспорт), при позиционировании железнодорожных цистерн на сливо-наливной эстакаде (железнодорожный транспорт), при позиционировании корпусов воздушных судов на местах стоянки в ангарах (воздушный транспорт), при позиционировании грузового автомобиля относительно пакгауза в процессе загрузки и выгрузки (автодорожный транспорт).

Результаты работы реализованы и используются в технических решениях для автономной швартовки морских судов производства ООО «СМАРТТЕХНОЛОГИЯ».

Отдельные методы, представленные в работе, могут иметь широкое применение в различных отраслях для задач мониторинга положения объектов сложной формы методами компьютерного зрения.

**Достоверность и обоснованность результатов** подтверждена экспериментальной проверкой результатов предлагаемых методов на тестовых выборках данных записанных автором работы и тестовых выборках данных из публичных репозиториев данных; результатами стендовых и натурных испытаний действующих макетов оптических измерителей входящих в состав макета программно-аппаратного комплекса высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы; публикациями и докладами результатов.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ.

**Личный вклад автора в проведённые исследования.** В диссертацию вошли результаты, которые получены лично автором. Результаты других авторов, упомянутых в диссертации, носят справочный характер и имеют соответствующие обозначения.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Вторая международная научно-практическая конференция Математическое и компьютерное моделирование (2016), Новое поколение в науке – 2018, Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction (2020), Ural Environmental Science Forum “Sustainable Development of Industrial Region” (UESF-2021), International Conference on Actual Issues of Mechanical Engineering (AIME 2021).

**Реализация результатов.** Методы и алгоритмы, полученные в результате работы, планируется использовать в системах автономного судовождения морских и речных судов, системах управления движением автономных транспортных средств, в том числе, воздушных, железнодорожных и наземных, а также в составе автономных промышленных систем.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Главы состоят из параграфов. В работе используется сквозная нумерация формул. В каждой главе используется своя автономная нумерация таблиц и иллюстраций. Объём диссертации 152 страницы. Список литературы содержит 89 наименований.

Глава 1. Разработка системы высокоточного определения положения объектов  
Материалы данной главы опубликованы в работах [37, 38, 40, 42, 43].

## 1.1 Высокоточное определение положения объектов относительно стационарной базы с применением оптических измерителей

Примерами задач высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы (высокоточного позиционирования) являются:

- позиционирование морского судна относительно причала при выполнении погрузо-разгрузочных работ и швартовных операций;
- позиционирование железнодорожного вагона при взвешивании на весах, при наливе цистерн, при загрузке сыпучим грузом;
- позиционирование корпуса воздушного судна в ангаре для выполнения ремонтно-профилактических работ, при стыковке с телескопическим трапом;
- позиционирование грузового автомобиля при загрузке и выгрузке, при взвешивании на весах, относительно пакгауза;
- и многие другие.

При решении задачи высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы необходимо бесконтактно с высокой точностью выполнять измерения продольного, поперечного и вертикального смещения подвижного объекта, учитывая особенности его размера, формы, скорости маневрирования, скорости движения.

Задача высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы должна решаться независимо от уровня освещённости, погодных условий (дождь, снег, град, туман, пыльные бури), изменения взаимного расположения объектов (частичное или полное перекрытие отслеживаемого объекта), с оценкой текущих и прогнозированием будущих пространственно-скоростных параметров отслеживаемого объекта.

Для решения задачи объекты должны непрерывно отслеживаться на всех этапах измерений. Этапы измерений на примере морского крупнотоннажного судна включают: подход судна, швартовку судна, погрузо-разгрузочные работы и отход судна от причала.

Под крупнотоннажным судном в данной работе подразумевается судно дедвейтом свыше 1.5 тыс. тонн и длиной свыше 60 метров.

Для решения задачи высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы предлагается использовать оптический измеритель

[37], включающий лазерный дальномер, камеру и компьютер. Измерения вертикального и горизонтального смещения выполняются методами компьютерного зрения. Измерения поперечного смещения выполняются фазовым методом.

### 1.1.1 Высокоточное позиционирование морского крупнотоннажного судна относительно причала

Обеспечение навигационной безопасности плавания является сложной многоуровневой задачей, для решения которой необходимы комплексные мероприятия, например, контроль состояния акватории, организация береговой инфраструктуры и высокоточное управление судовыми системами. Контроль состояния акватории включает оперативное получение информации о текущей навигационной обстановке, что необходимо для современного водного транспорта с высокой степенью автоматизации, перспективных безэкипажных и автономных судов. Обеспечение навигационной безопасности включает решение задач по снижению риска возникновения аварийных ситуаций на подходах к портам и в акваториях морских и речных портов [38].

Швартовка судна является наиболее часто выполняемой операцией в акватории порта. Она несёт в себе опасности навала судна на причал, вывода из строя оборудования и техники, экологических аварий, человеческих жертв, потери груза и повреждений судна. Для снижения риска возникновения аварийных ситуаций необходимо контролировать с высокой точностью каждый элемент швартовной операции, включая:

- выбор направления и скорости движения судна для предотвращения навала;
- подход судна к причалу с разворотом в выбранном направлении;
- удержание судна возле причала;
- удержание на месте на время подачи швартовов;
- подтягивание судна к причалу.

Правила плавания судов в акватории порта, швартовки, стоянки, скоростные режимы определяются для каждого порта в сборнике обязательных постановлений. Правила составляются с учётом типов причалов, глубины подходов, узостей, стеснённости акватории и прочих факторов.

В качестве примера выбраны требования к швартовке морских крупнотоннажных судов к причалам на основе сборника обязательных распоряжений по морскому торговому порту Новороссийск [39]. Эти требования определяют исходные данные для задачи высокоточного позиционирования корпуса судна относительно причала.

При подходе и швартовке к причалам и пирсам на внутренней акватории должны соблюдаться следующие условия:

- угол подхода судна к причалам (пирсам) должен быть не более 20 градусов;
- скорость сближения судна с причалом не должна превышать 0.22; 0.15; 0.13; 0.11; 0.10; 0.09; 0.08 м/с при водоизмещении судов соответственно до 2; 5; 10; 20; 40; 100; 200 тыс. тонн;
- швартовные операции не осуществляются при ветре выше 17 м/сек и при получении штормового предупреждения (либо допускается по специальному разрешению капитана порта);
- проводка и сближение судна с причалом осуществляется с помощью буксиров, при условии валовой вместимости судна 200 регистрах тонн или более.

Исходя из условий плавания и швартовки судов, задача высокоточного позиционирования морского крупнотоннажного судна возле причала должна решаться:

1. независимо от уровня освещённости в течение рабочего цикла измерителя. В тёмное время суток в соответствии с Приказом Министерства транспорта РФ от 12 ноября 2021 г. №395 "Об утверждении Общих правил плавания и стоянки судов в морских портах Российской Федерации и на подходах к ним" (IV. Правила стоянки судов в морских портах и на подходах к ним) причал должен быть освещён. Что значит, в тёмное время суток на причале будет дополнительная подсветка.
2. независимо от погодных условий (дождь, снег, град, туман, пыльные бури). При условии видимости более 5 кбт (1 кбт – 1/10 морской мили (185,2 метра)) (Таб. 1.1-1).
3. независимо от изменения взаимного расположения объектов (частичное или полное перекрытие отслеживаемого объекта). Т.к. суда валовой вместимости 200 регистрах тонн или более швартуются с помощью буксиров, судно может быть частично перекрыто буксиром.

Таб. 1.1-1 Шкала видимости

Характеристика видимости	Условия наблюдения	Интервал видимости в кабельтовых, милях	Примерный интервал видимости в метрах, километрах
Очень плохая	Очень сильный туман	0-1.4 кбт	0-50 м

Очень плохая	Сильный туман, густой снег	1/4-1 кбт	50-200 м
Очень плохая	Умеренный туман, сильный снег	1-3 кбт	200-500 м
Плохая	Слабый туман, умеренный снег или сильная мгла	3-5 кбт	500 м-1 км
Плохая	Умеренный снег, сильный дождь, умеренная дымка или мгла	5 кбт-1 миля	1-2 км
Средняя	Слабый снег, сильный дождь, слабая дымка или мгла	1-2 мили	2-4 км
Средняя	Умеренный дождь, очень слабый снег, слабая дымка или мгла	2-5 миль	4-10 км
Хорошая	Слабый дождь	5-11 миль	10-20 км
Очень хорошая	Без осадков	11-27 миль	2-50 км
Исключительная	Чистый воздух	свыше 27 миль	свыше 50 км

Задача позиционирования судна возле причала заключается в отслеживании смещения судна (продольного, поперечного и вертикального) относительно причала, расчёта угла поворота, скорости движения судна, оценки текущих и прогнозирования будущих пространственно-скоростных параметров.

Отслеживание смещения судна относительно причала начинается на этапе подхода судна к причалу, продолжается во время швартовки судна, стоянки, погрузо-разгрузочных работ [40] и отшвартовки. Границы области отслеживания судна относительно причала составляют от 2 до 500 метров в продольном, поперечном и вертикальном направлениях (обусловлено необходимостью контроля движения судна с точностью в десятки сантиметров на дистанции манёвра последнего момента, которая равна 2 или 1 длине корпуса судна).



Рис. 1-1 Кантовка судна буксирами

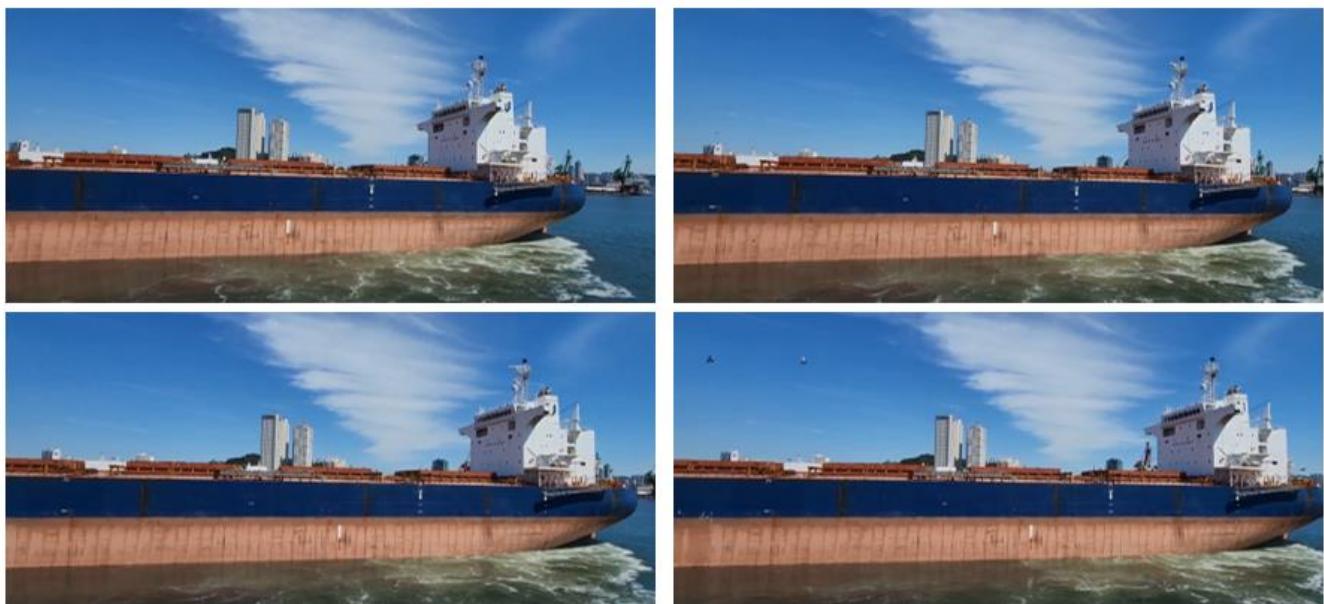


Рис. 1-2 Отход судна от причала

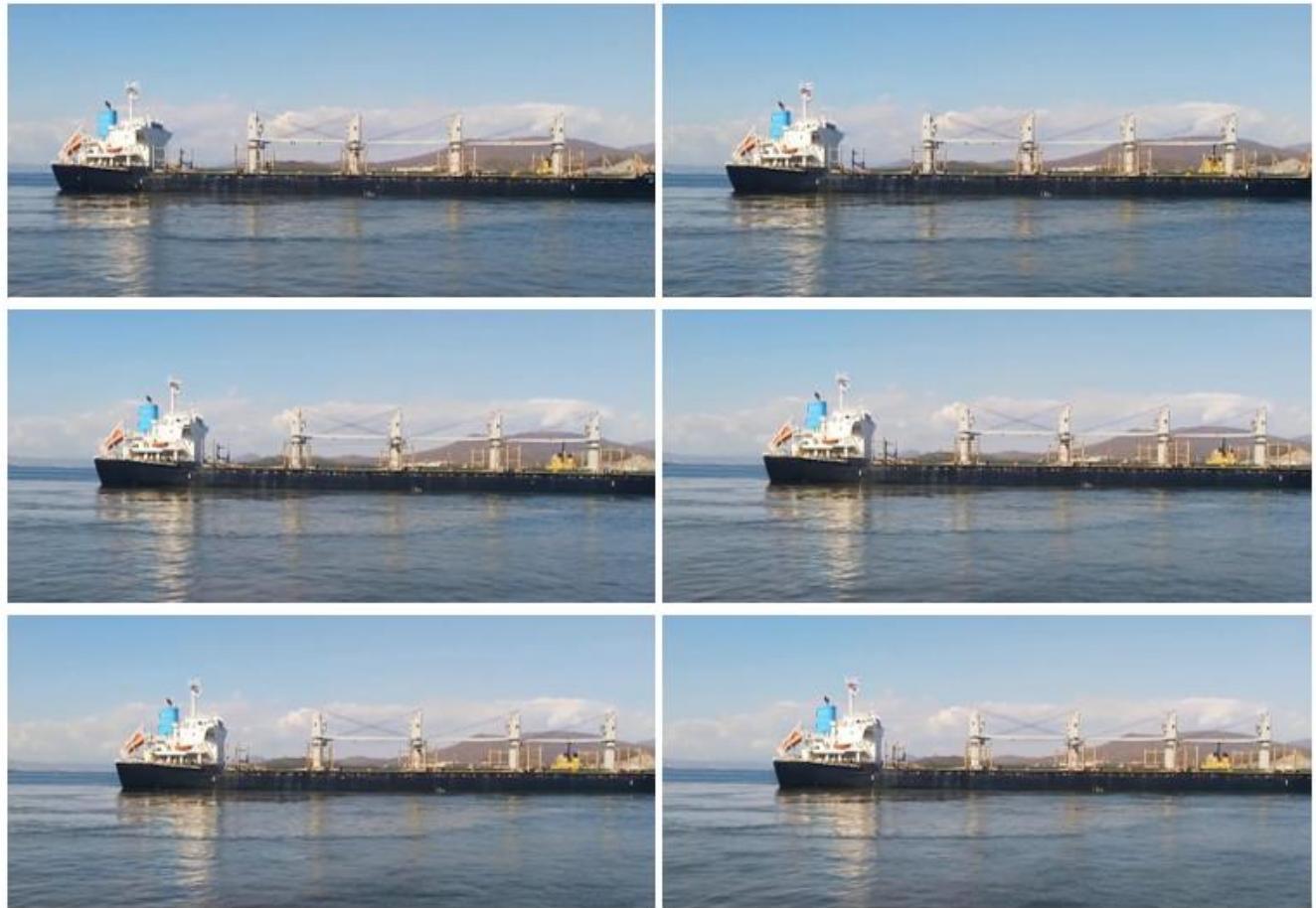


Рис. 1-3 Движение судна вдоль причала



Рис. 1-4 Стоянка судна, сближение судна с причалом (по центру),  
сближение судна с причалом (справа)

Для бесконтактного высокоточного измерения положения судна относительно причала в непосредственной близости от причала и при подходе судна к причалу предлагается использовать оптический измеритель, включающий лазерный дальномер, камеру компьютерного зрения и компьютер. Измерения вертикального и горизонтального смещения выполняются методами компьютерного зрения. Измерения поперечного смещения выполняются фазовым методом.

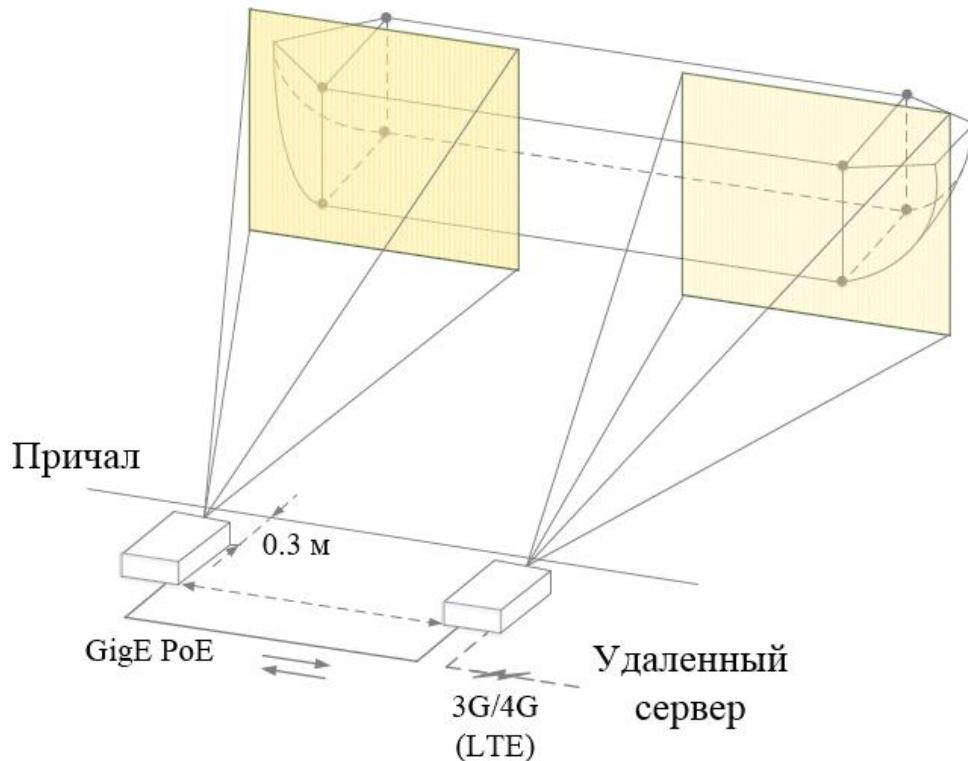


Рис. 1-5 Оптические измерители установленные на причале

Комплект из двух оптических измерителей, установленных на причале на некотором расстоянии друг от друга, позволит с высокой точностью выполнить измерения продольного, поперечного и вертикального смещения корпуса морского крупнотоннажного судна, учитывая особенности его размера, формы, скорости маневрирования, скорости движения.

Два оптических измерителя необходимы для:

- повышения точности измерений за счёт двух наборов данных и независимых измерений для носа и кормы судна,
- определения типа движения (смещение, поворот),
- оценки текущих и прогнозирования будущих пространственно-скоростных параметров отслеживаемого судна.

Измерительный комплекс, состоящий из двух оптических измерителей, позволит вовремя отследить и сигнализировать об экстренной ситуации подхода судна к причалу под большим углом и на слишком большой скорости. Он будет полезен для терминалов, осуществляющих погрузку и перевалку опасных грузов. В случае удаления судна дальше допустимого расстояния от причала измерительный комплекс повысит безопасность эксплуатации погрузочного рукава путем информирования об аварийной ситуации.

## 1.1.2 Высокоточное позиционирование транспортных средств с применением оптических измерителей

### 1.1.2.1 Высокоточное позиционирование железнодорожных транспортных средств

Примерами задач позиционирования железнодорожных транспортных средств являются:

- позиционирование вагонов на путях необщего пользования (например, на территории порта) при наливе цистерн, при загрузке сыпучим грузом, при выгрузке груза;
- замена тележек под вагонами для обеспечения бесперегрузочного железнодорожного сообщения в случаях, когда перегрузку проводить опасно или экономически невыгодно;
- токарная обработка поверхностей катания колесных пар вагонов или паровозов без выкатки тележек на специальных токарных станках [41];
- позиционирование железнодорожного вагона при взвешивании на весах с расцепкой и без расцепки железнодорожного состава;
- позиционирование железнодорожных цистерн на сливо-наливной эстакаде.

При позиционировании железнодорожных цистерн на сливо-наливной эстакаде, цистерны заводятся на эстакаду лебёдкой с тросом, установленным в тупиковой части ж/д пути, колёса цистерн блокируются, проводится заземление цистерн, подсоединяются патрубки налива и перекачивается нефтепродукт или другой наливной груз, либо при сливе груза сливо-наливные устройства заводят под цистерны и подсоединяют к патрубкам, слив осуществляется с помощью насосов.

Задача высокоточного определения положения железнодорожных цистерн относительно патрубков на сливо-наливной эстакаде может быть решена с применением оптических измерителей.

Использование оптических измерителей, на сливо-наливных эстакадах способно:

- повысить точность позиционирования цистерн относительно патрубков налива, тем самым повысить безопасность их эксплуатации путем информирования об аварийной ситуации;
- автоматизировать систему перемещения и позиционирования путём информирования о скорости движения, дальности перемещения, времени остановок.

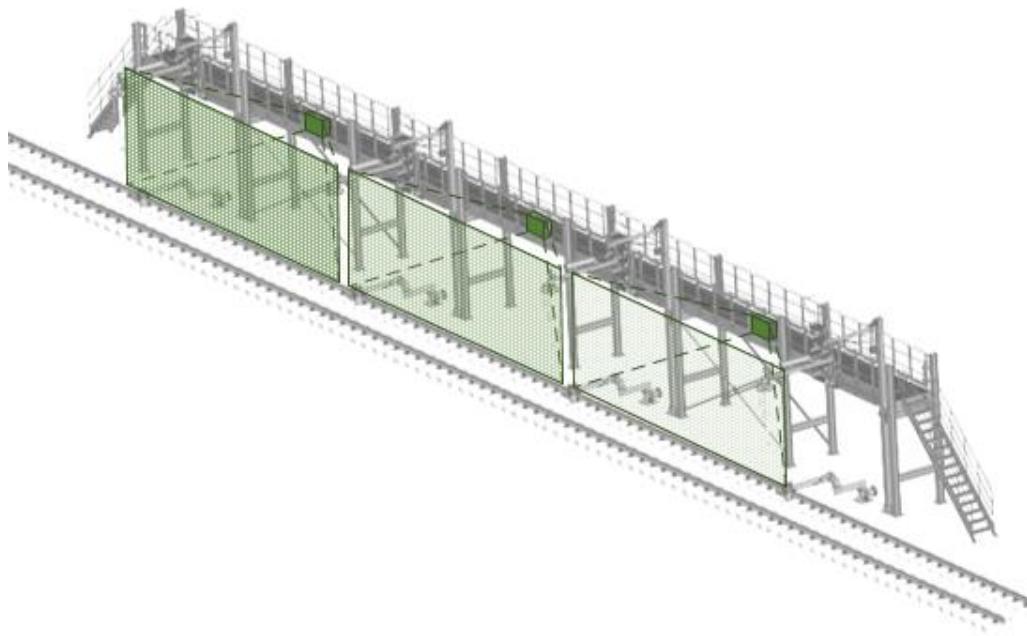


Рис. 1-6 Схема установки оптических измерителей на сливо-наливной эстакаде

Использование оптических измерителей для позиционирования железнодорожных транспортных средств позволит получить параметры смещения вагонов, учитывая особенности их размеров и скорости движения, ускорить процесс загрузки/выгрузки вагонов, контролировать сдвиг вагонов во время погрузки или разгрузки, повысить точность позиционирования вагонов при обслуживании и избежать ошибок взвешивания, вызванных неправильным положением вагонов на весах.

#### 1.1.2.2 Высокоточное позиционирование воздушных транспортных средств

Примерами задач позиционирования воздушных транспортных средств являются:

- позиционирование корпуса воздушного судна при постановке в ангар для выполнения ремонтно-профилактических работ;
- позиционирование корпуса воздушного судна при стыковке с телескопическим трапом;
- позиционирование корпусов воздушных судов на местах стоянки в ангарах.

При постановке в ангар для выполнения ремонтно-профилактических работ, воздушное судно заводится в ангар и позиционируется на отведённом для него месте, относительно судна в рабочей зоне позиционируются док для обслуживания воздушного судна.

Задачу автоматизации позиционирования судна в ангаре можно решить с помощью оптических измерителей.

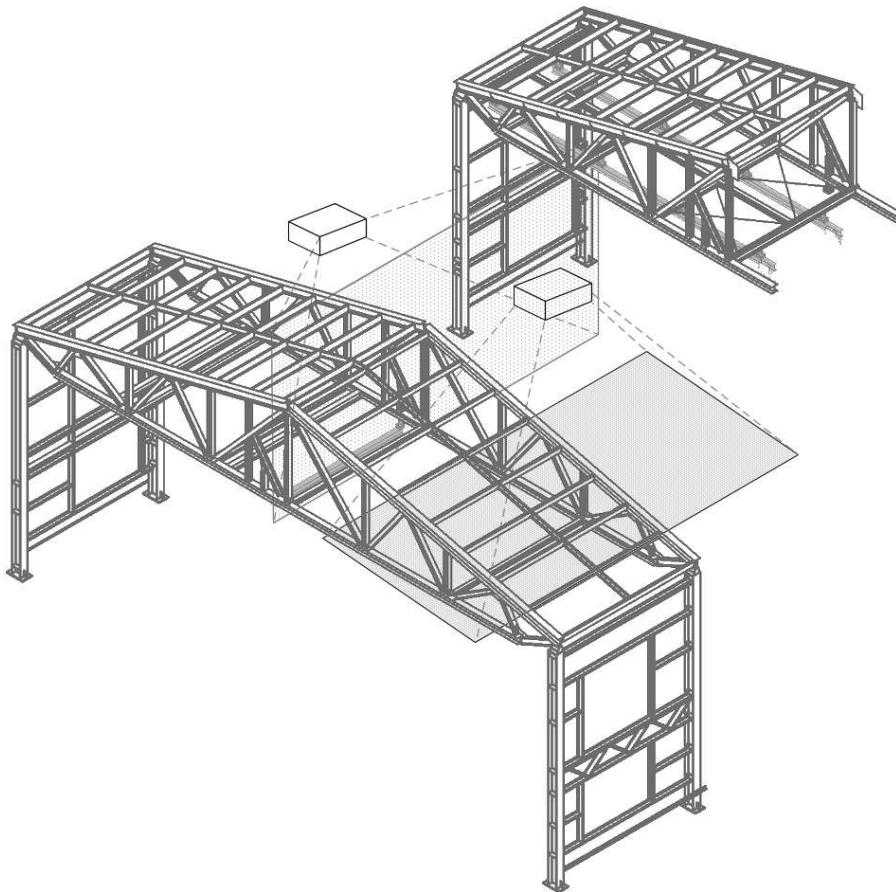


Рис. 1-7 Схема установки оптических измерителей в ангаре ремонтно-профилактического обслуживания

Использование оптических измерителей позволит ускорить процесс парковки воздушного судна.

#### 1.1.2.3 Высокоточное позиционирование автодорожных транспортных средств

Примерами задач позиционирования автодорожных транспортных средств являются:

- позиционирование грузового автомобиля при загрузке и выгрузке относительно пакгауза;
- позиционирование автоцистерны на сливо-наливной эстакаде;
- позиционирование автодорожного транспортного средства при взвешивании на весах.

При взвешивании автодорожного грузового автомобиля на весах, грузовой автомобиль заезжает на платформу весов, платформа стабилизируется, фиксируется взвешивание.

Контроль положения грузового автомобиля при взвешивании на весах с помощью оптического измерителя позволит регулировать грузопоток, проходящий через автомобильные весы, автоматизировать процесс взвешивания и исключить неверный результат взвешивания при неполном заезде или съезде автомобиля с платформы весов.

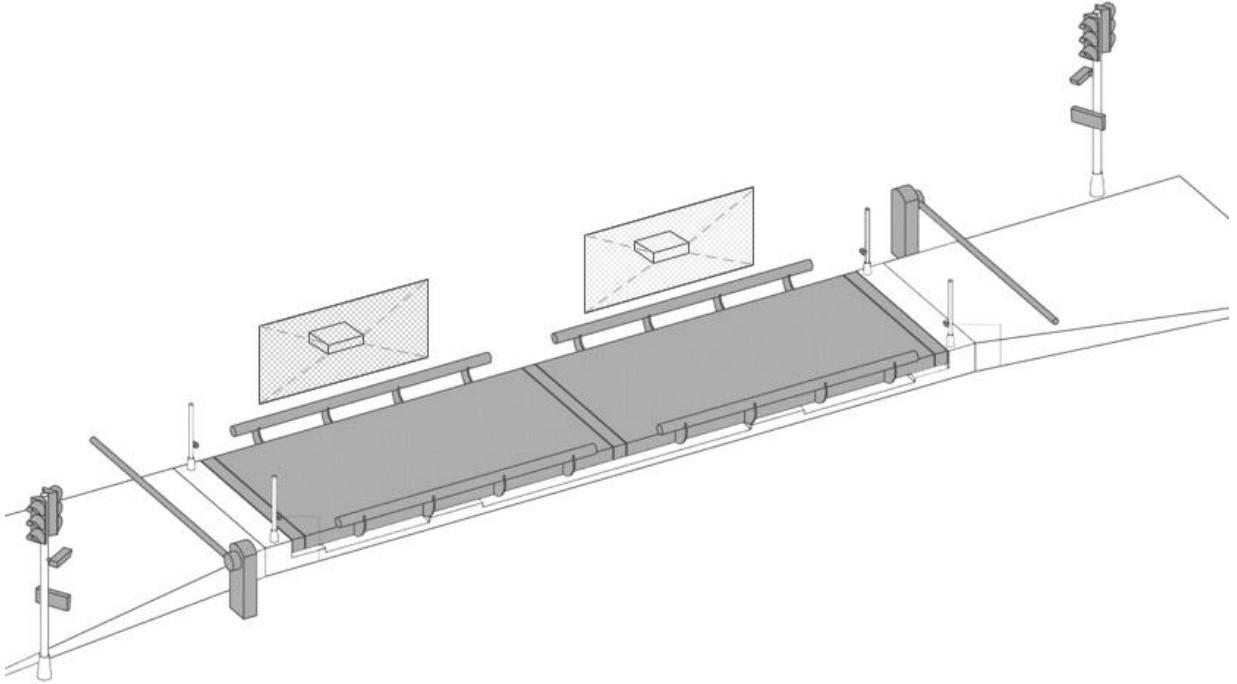


Рис. 1-8 Схема установки оптических измерителей на автомобильных весах

Использование оптических измерителей в задачах позиционирования транспортных средств с целью регулирования и автоматизации процессов парковки, погрузки/разгрузки позволит увеличить грузооборот, повысить безопасность транспортных процессов, интенсивность транспортного потока и пропускную способность транспортной системы.

## 1.2 Модель измерительного комплекса на основе оптических измерителей

Оптический измеритель должен бесконтактно с высокой точностью решать задачу позиционирования крупногабаритного площадного объекта относительно стационарной базы. Для решения задачи позиционирования необходимо определять продольное, поперечное и вертикальное смещения объекта относительно места установки измерителя. Выбор места установки измерителя для позиционирования морского крупнотоннажного судна осуществляется на причале, к которому швартуется судно.

Далее по тексту все иллюстрации процесса позиционирования будут приводиться в контексте позиционирования морского крупнотоннажного судна

относительно причала при подходе, швартовке, стоянке, выполнении погрузо-разгрузочных работ или отшвартовке судна от причала.

Как было указано в разделе 1.1.1, задача позиционирования морского крупнотоннажного судна должна решаться независимо от уровня освещённости в течение рабочего цикла измерителя, погодных условий (дождь, снег, град, туман, пыльные бури) при условии видимости более 1 км, изменения взаимного расположения объектов (частичное или полное перекрытие отслеживаемого объекта), с оценкой текущих и прогнозированием будущих пространственно-скоростных параметров отслеживаемого объекта.

Время рабочего цикла измерителя зависит от длительности подхода судна к причалу, швартовых операций и необходимости в позиционировании судна относительно причала на протяжении стоянки или погрузо-разгрузочных работ. Среднее время рабочего цикла измерителя составляет 1 час.

Оптический измеритель [42, 43] представляет собой программно-аппаратный комплекс включающий лазерный дальномер, камеру компьютерного зрения с объективом, компьютер с 3G/4G (LTE) модемом в составе, antennу 3G/4G (LTE) (Рис. 1-9). Обмен данными между компьютером и оптическими измерителями происходит по технологии Ethernet.

Измерение поперечного смещения выполняет лазерный дальномер, установленный в оптический измеритель. Метод измерения основан на сравнении фаз сигнала лазера и сигнала, отражённого от объекта. Задержка при распространении волны создает сдвиг фаз, который измеряется. Лазер работает постоянно, его излучение амплитудно модулируется сигналом определенной частоты [44, 45, 46]. Фаза отражённого сигнала сравнивается с фазой опорного сигнала [47, 48].

Измерения вертикального и горизонтального смещений выполняются методами компьютерного зрения, представленными в работе далее.

Для измерения смещений крупногабаритных объектов, таких как морские суда, рекомендуется использовать комплект из нескольких оптических измерителей, что позволит расширить перечень измеряемых величин. Комплект из двух оптических измерителей позволит рассчитать продольное, поперечное и вертикальное смещение отдельно для носа и кормы судна, скорость движения и угол поворота относительно причала.

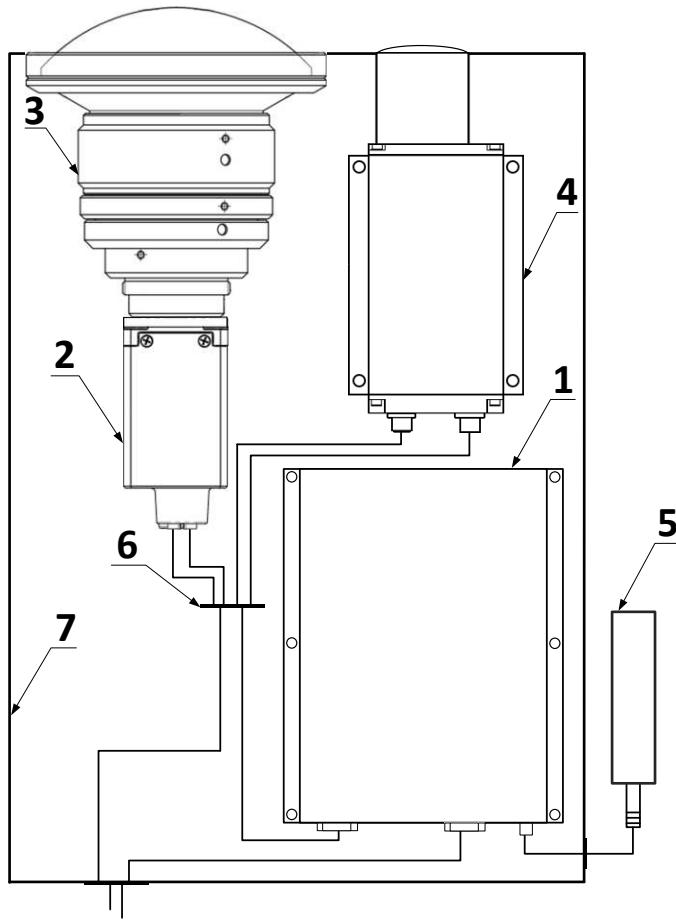


Рис. 1-9 Схема аппаратного обеспечения оптического измерителя:  
компьютер (1) в корпусе (7); камера компьютерного зрения (2) с объективом (3);  
лазерный дальномер (4); антenna (5)

При использовании комплекса из двух оптических измерителей, один из измерителей будет управляющим, второй – управляемым. Управляющий измеритель содержит компьютер, выполняющий обработку данных и вычисления, камеру компьютерного зрения с объективом, лазерный дальномер и antennу 3G/4G (LTE) для отправки данных с целью их дальнейшего использования. Управляемый оптический измеритель, состоящий из камеры компьютерного зрения с объективом и лазерного дальномера, по технологии Ethernet подключается к управляющему оптическому измерителю. Данные с управляемого измерителя обрабатывает управляющий измеритель.

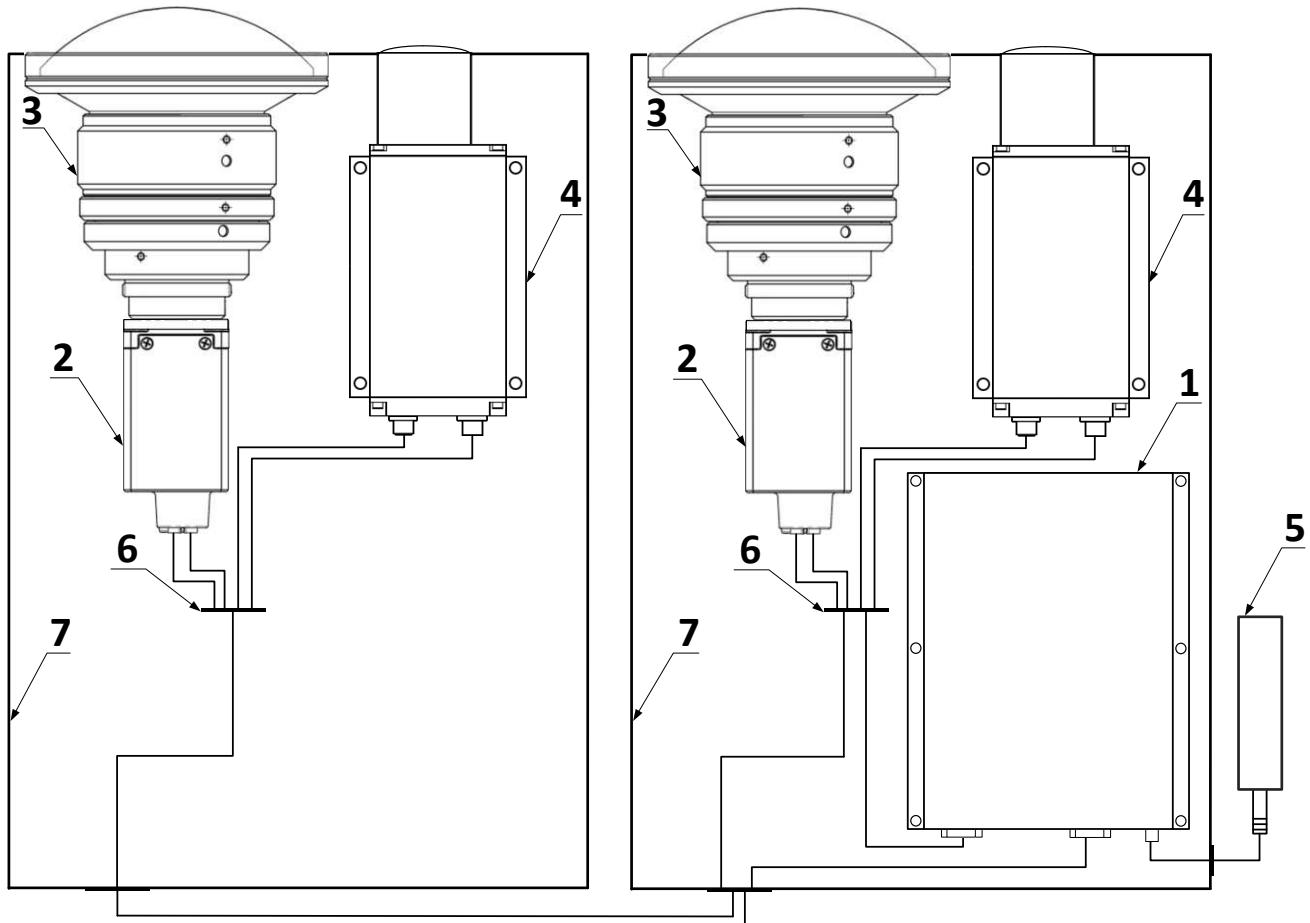


Рис. 1-10 Схема соединений двух оптических измерителей  
 (слева – управляемый измеритель, справа – управляющий измеритель):  
 компьютер (1) в корпусе (7); камера компьютерного зрения (2) с объективом (3);  
 лазерный дальномер (4); антенна (5)

По аналогичной схеме подключаются 3 и более измерителей: один управляющий измеритель и несколько управляемых измерителей.

Оптические измерители (ОИ) устанавливаются на причале на неподвижном основании в непосредственной близости от края причала, но не более 30 см от края, чтобы не допустить перекрытия луча лазера и объектива камеры работниками порта, транспортными средствами и причальными сооружениями (Рис. 1-11).

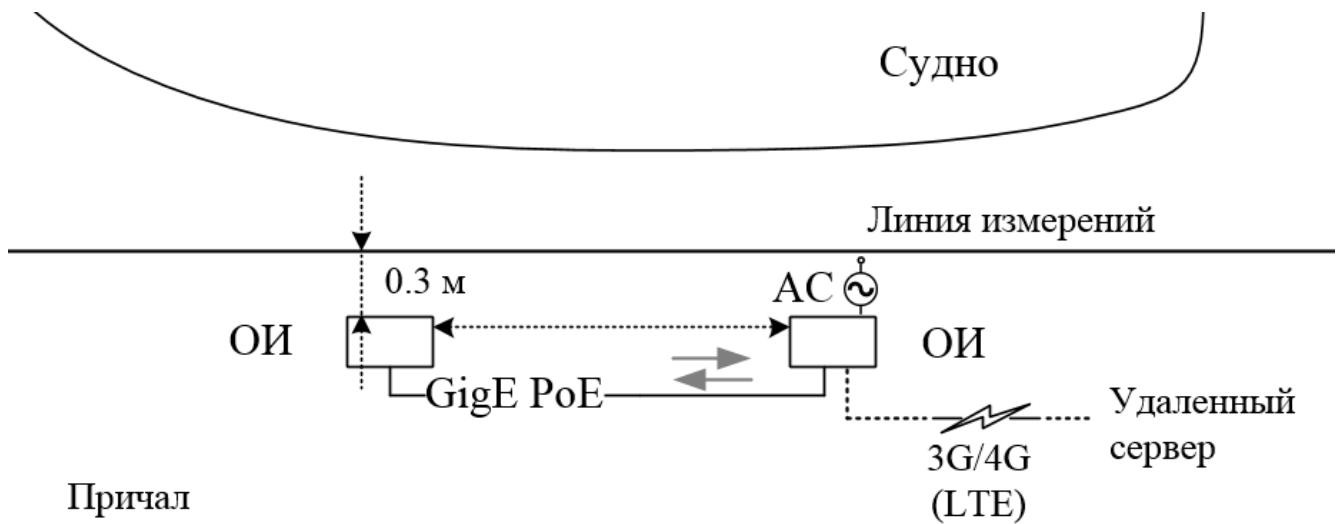


Рис. 1-11 Схема установки комплекса из двух оптических измерителей на причале

### 1.2.1 Требования к характеристикам лазерного дальномера

Исходя из требований, изложенных в разделе 1.1.1, измерения начинаются при подходе судна к причалу, продолжаются во время швартовки судна и выполнении погрузо-разгрузочных работ. Границы области отслеживания судна относительно причала составляют от 2 до 500 метров в поперечном направлении.

Оптические измерители, как и всё оборудование, устанавливаемое на причале, должно быть промышленного исполнения. Измерители устанавливаются на причале не далее, чем на 30 см от края причала, и при сильном волнении моря кратковременно могут оказаться под водой. Поэтому класс защиты оборудования должен быть не ниже IP67 (6 – пыленепроницаемое (полная защита от пыли), 7 – водонепроницаемое (кратковременное погружение на глубину до 1 м)).

Оборудование, устанавливаемое внутри корпуса оптических измерителей, может иметь класс защиты IP00 (0 – нет защиты, 0 – нет защиты).

Таб. 1.2-1 Требования к характеристикам лазерного дальномера

Наименование	Характеристики	Примечания
Метод измерений	фазовый	
Дистанция	от 2 до 500 метров	
Погрешность измерения	не более $\pm 1$ мм на каждый метр дистанции	зависимость точности от расстояния линейная: $\pm 20$ мм на дистанции в 20 м,

		$\pm 50$ мм на дистанции в 50 м  и далее по возрастающей
Температурный режим	-20...+50°C	
Частота данных	не менее 20 ГЦ	
Класс защиты	от IP00 (модуль без корпуса)	дальномер устанавливается внутри корпуса оптического измерителя
Безопасность	Класс 1	безопасный для человеческого глаза ближний ИК диапазон, от 900 до 1100 нм

### 1.2.2 Требования к характеристикам камеры компьютерного зрения

Камера в оптическом измерителе нужна для оптического контроля и измерений [49, 50], следовательно, нужна промышленная камера компьютерного зрения, которая обладает устойчивостью к механическим, вибрационным, электромагнитным воздействиям, что позволяет использовать её в различных погодных условиях [51].

Должна быть обеспечена защита от воды и пыли, виброустойчивость, возможность работы в широком температурном диапазоне.

Таб. 1.2-2 Требования к характеристикам камеры компьютерного зрения

Наименование	Характеристики	Примечания
Разрешение	не менее 640×480	чем выше разрешение, тем больше данных об объекте съёмки
Тип изображения	монохромное	работа с цветными, мульти- и гиперспектральными изображениями в алгоритмах, на базе которых работает оптический измеритель, не предусмотрена
Частота кадров	не менее 40 к/с	необходимо для корректной работы алгоритмов

		компьютерного зрения для оптического контроля и измерений
Температурный режим	-10...+50°C	
Интерфейс передачи данных	GigE	Gigabit Ethernet позволяет передавать данные на расстояние до 100 м с высокой скоростью и без потерь
Тип исполнения	промышленный	

Таб. 1.2-3 Требования к характеристикам объектива

Наименования	Характеристики		Примечания
Фокусное расстояние		~ 5 мм	для задач оптического контроля и измерений, для таких крупногабаритных объектов, как морские суда, необходим широкофокусный объектив
Диапазон диафрагмы		F2.4-F11	регулировка размера диафрагмы в зависимости от условий окружающей среды позволит получить желаемый уровень экспозиции
Угол обзора	по диагонали	> 100°	минимально необходимые значения
	по горизонтали	> 80°	
	по вертикали	> 60°	
Температурный режим	-10...+50°C		
Тип исполнения	промышленный		

### 1.2.3 Требования к характеристикам компьютера оптического измерителя

Характеристики компьютера выбраны на основании:

- требований по совместимости с камерами компьютерного зрения и лазерными дальномерами;

- необходимости обработки нескольких потоков данных с лазерных дальномеров;
- необходимости обработки нескольких потоков данных с камер компьютерного зрения;
- требований к вычислительной среде исполнения алгоритмов компьютерного зрения.

Таб. 1.2-4 Требования к характеристикам компьютера оптического измерителя

<b>Наименование</b>	<b>Характеристики</b>	<b>Примечания</b>	
Производительность ЦПУ	$\geq 260 \text{ GFLOPS}$		
Разрядность ЦПУ	$\geq 64\text{-bit}$		
Тип оперативной памяти	DDR4		
Объём оперативной памяти	$\geq 16 \text{ Gb}$		
Объём ПЗУ	$\geq 120 \text{ Gb}$	для кратковременного хранения данных, с целью их оценки	
Разрядность операционной системы	$\geq 64\text{-bit}$		
Производительность графического процессора в операциях с плавающей точкой одинарной точности	$\geq 115 \text{ GFLOPS}$		
Количество портов	RJ-45	$\geq 2 \times 10/100/1000$	необходимые интерфейсы для подключения периферийных устройств
	RS-232/422/485	$\geq 2$	
	USB 3.x	$\geq 4$	
Температурный режим	-10...+50°C		

### 1.3 Настройка совместной работы камеры и лазерного дальномера

#### 1.3.1 Порядок использования. Штатный режим работы

Оптические измерители имеют 3 режима работы:

##### 1. Режим самотестирования.

Запускается автоматически при каждом включении измерителя. В этом режиме проверяется работоспособность компонентов оптического

измерителя. Если используется комплекс из измерителей, управляющий измеритель проверяет работоспособность всех управляемых измерителей.

## 2. Режим измерений.

Запускается автоматически после режима самотестирования. В этом режиме измерительный комплекс транслирует данные с заданной частотой.

## 3. Режим сбора данных.

Запускается по команде оператора для обслуживания измерительного комплекса. В этом режиме собираются данные с камер и лазерных дальномеров и сохраняются во внутреннюю память компьютера управляющего измерителя.

При подаче питания, измерительный комплекс входит в режим самотестирования, если все компоненты измерителей функционируют, измерительный комплекс переходит в режим измерений и начинает транслировать данные с заданной частотой.

Для завершения работы измерительного комплекса, в адрес управляющего измерителя отправляется сигнал завершить работу.

Режим сбора данных – специальный режим, в котором измерительный комплекс накапливает данные для обслуживания, в том числе юстировки конструктивных элементов измерителей и калибровки выходных величин.

### 1.3.2 Особенности юстировки элементов измерительного комплекса

Юстировка необходима для:

- устранения погрешностей, выявленных в результате контроля или поверки камер и лазерных дальномеров;
- уменьшение влияния статических ошибок на вычисления.

Камера и лазерный дальномер располагаются на одном уровне (ось направлена по касательной в точке установки оптического измерителя параллельно земле), с соблюдением сонаправленности оптических осей. Регулирование взаимного расположения выполняется при помощи поворотных кронштейнов, винтов или других конструктивных элементов.

На причале оптические измерители устанавливаются перпендикулярно линии измерений, которая может не совпадать с линией причала ввиду его конструктивных особенностей.

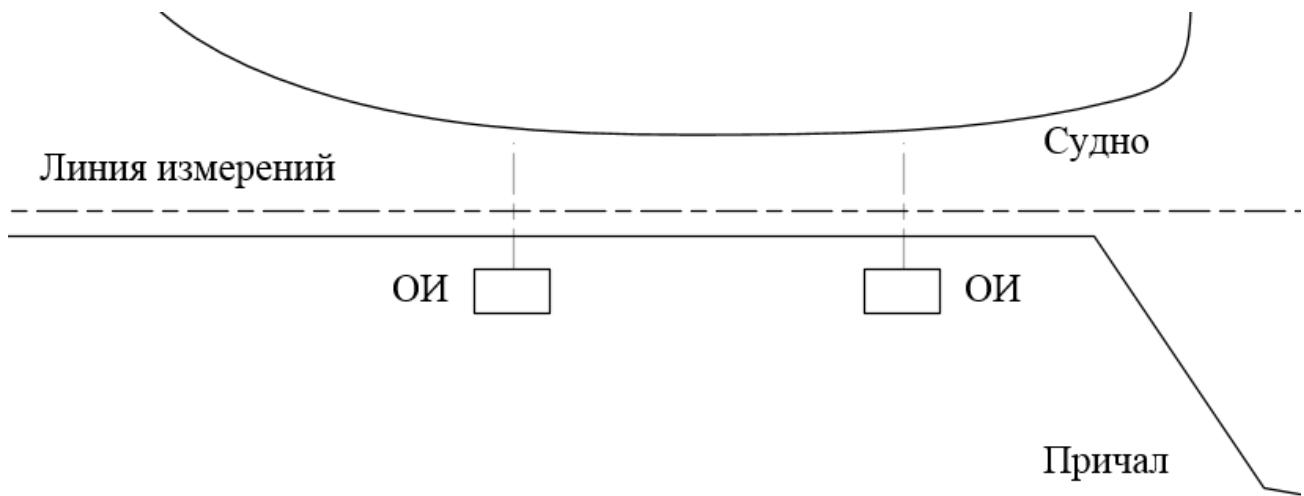


Рис. 1-12 Схема установки комплекса из двух оптических измерителей

## Глава 2. Разработка метода идентификации крупногабаритного площадного объекта в кадре

Материалы данной главы опубликованы в работах [52, 54].

Изображение судна на разных дистанциях от камеры занимает разную часть кадра. Если на 500 метрах судно полностью помещается в кадр, то по мере приближения судна к причалу фрагмент судна занимает большую часть кадра или весь кадр (Рис. 2-1).

В зависимости от типа причала (например, пирс или набережная стенка), его расположения, особенностей выполнения швартовных операций, в кадр могут попадать буксиры, другие суда, причальные сооружения.

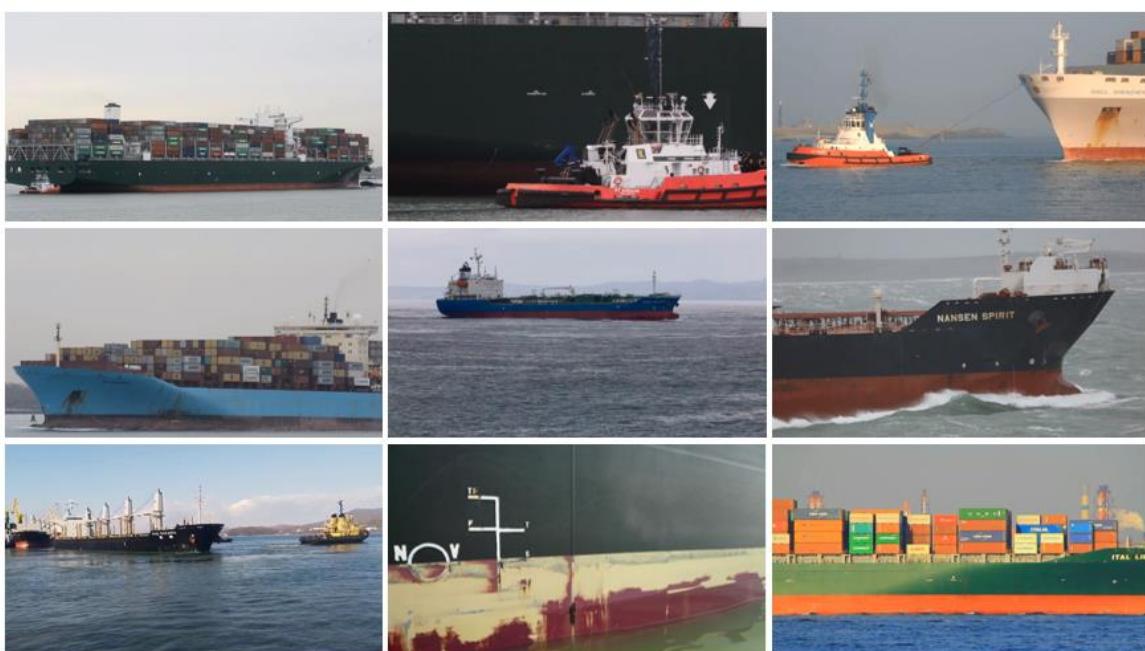


Рис. 2-1 Морские крупнотоннажные суда на различных расстояниях от причала

Отслеживание смещения судна относительно причала начинается на этапе подхода судна к причалу, продолжается во время швартовки судна, стоянки, выполнении погрузо-разгрузочных работ и отшвартовки. Границы области отслеживания судна относительно причала составляют от 2 до 500 метров в продольном, поперечном и вертикальном направлениях.

Скорость движения судна во время швартовных операций не превышает 3 узлов (5.556 км/ч), но алгоритм начинает работать ещё на этапе подхода судна к причалу, когда судно находится на расстоянии 300-500 метров, на этом этапе скорость судна может достигать 5 узлов.

Следующие факторы могут вносить неопределённость в условия съёмки:

- погодные условия (дождь, снег, яркое солнце, туман);
- изменение уровня освещённости в течение рабочего цикла измерителя;
- изменение взаимного расположения объектов (частичное или полное перекрытие отслеживаемого объекта);
- сложный фон (другое движущееся судно в кадре позади отслеживаемого).

## 2.1 Метод определения движения в кадре

В этом параграфе под объектами понимаются части кадра, содержащие изображения таких объектов, как суда, причальные сооружения, небо, вода и быстро движущиеся объекты, случайно попавшие в кадр (птицы, насекомые и т.д.).

Движение в кадре определяется с целью сегментации объектов кадра, выбора объекта отслеживания, сопровождения этого объекта и последующей работы с ним [52].

На протяжении всего рабочего цикла оптического измерителя движение в кадре определяется постоянно, но с разной частотой. На первой последовательности кадров движение в кадре определяется для того, чтобы собрать информацию о присутствующих в кадре движущихся объектах и выбрать объект отслеживания, подходящий по критериям соответствия морскому крупнотоннажному судну. По мере работы оптического измерителя выбранный для отслеживания объект уточняется, поскольку некоторые части объекта выходят за границы кадра, скорость объекта меняется, возможно частичное перекрытие объекта, изменение его формы, так как по мере приближения судна к причалу, судно может выполнить разворот. При этом на заднем плане может появится схожий объект, с похожими скоростными параметрами отслеживаемого.

На первом этапе делается оценка разницы между двумя соседними кадрами. Из текущего кадра попиксельно вычитается предыдущий кадр. Перед этим значения яркости пикселей обоих кадров нормализуются в диапазон [0;1] (Рис. 2-2) и сглаживаются прямоугольным фильтром низких частот со скользящим окном размером  $5 \times 5$  (Рис. 2-3) (1). Фильтр позволяет сгладить на изображении мелкие детали, незначащие, на этом этапе.

$$k = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Для оптимизации времени исполнения отдельных операций алгоритмов, метод реализующий операцию может быть заменён на аналогичный. Например, для низкочастотной фильтрации в зависимости от требований к производительности

программной реализации алгоритма можно выбрать либо метод, представленный в работе, либо его более оптимизированный аналог [53].

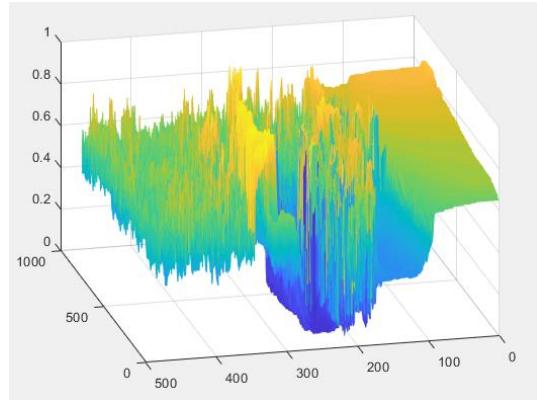


Рис. 2-2 Визуализация яркости пикселей изображения нормализованных в диапазон  $[0;1]$

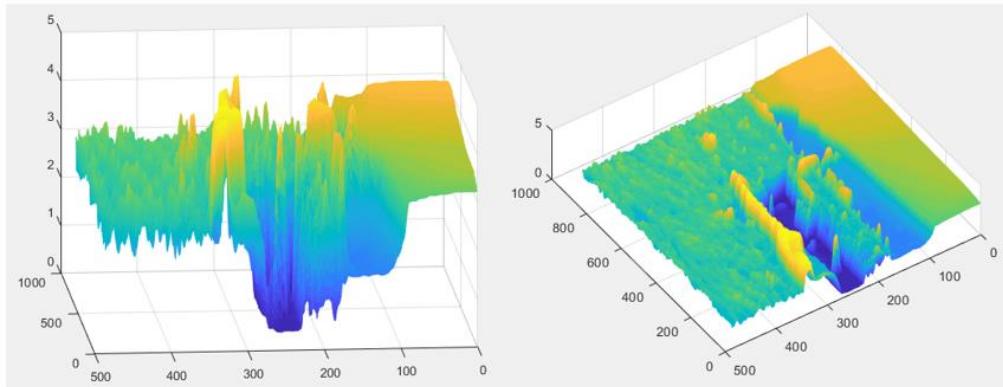


Рис. 2-3 Визуализация в разных проекциях яркости пикселей изображения после применения прямоугольного фильтра низких частот

К изображению применяется пороговое преобразование: яркость всех пикселей, имеющих значение больше  $m$  приравнивается к  $m$ , значения яркости остальных пикселей не меняются (Рис. 2-4).

Значение параметра  $m$  подбирается в зависимости от условий работы. По результатам анализа тестовой выборки видеофайлов, с различными вариантами подходов и швартовок судов к целевому причалу было установлено, что оптимальное значение  $m = 1$ . Значение  $m = 1$  является средним значением яркости предобработанного изображения (глобальный порог). Под целевым причалом понимается причал, на который устанавливаются оптические измерители.

Использование в работе готовых программных реализаций алгоритмов порогового преобразования осложняется подбором параметров, а также непредсказуемостью результатов.

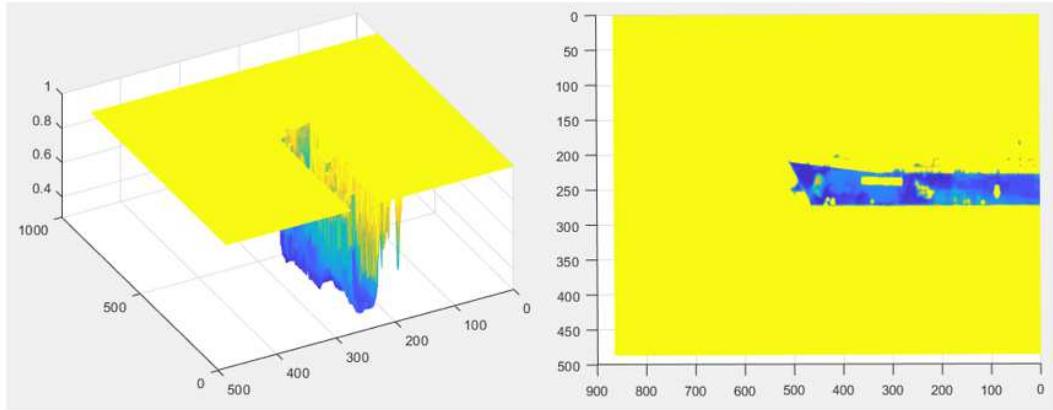


Рис. 2-4 Визуализация в разных проекциях яркости пикселей изображения после применения порогового преобразования

Из текущего кадра попиксельно вычитается предыдущий кадр (Рис. 2-5, Рис. 2-6, Рис. 2-7). Пиксели отличные от нуля – это подвижные участки изображения. Далее они приравниваются к единице. Таким образом, результатом первого этапа обработки становится бинаризованное изображение.

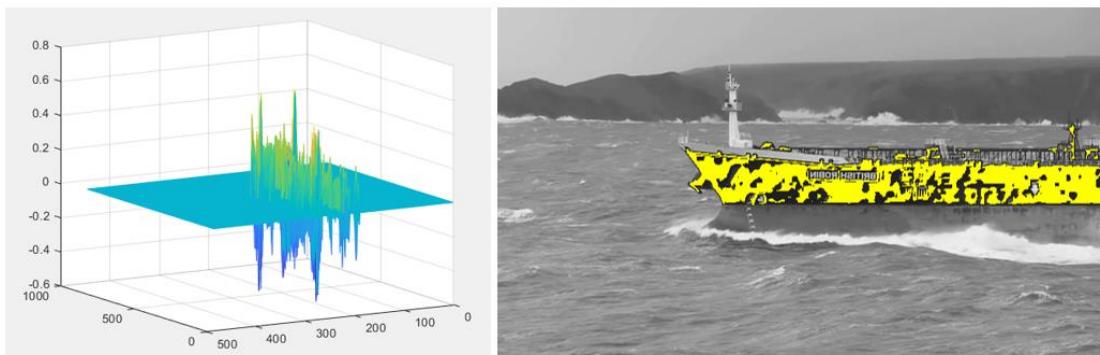


Рис. 2-5 Визуализация разности двух соседних кадров

Представленный способ определения разницы между соседними кадрами позволяет выделить тёмные участки изображения, которые находятся в движении.



Рис. 2-6 Визуализация разности кадров с перекрытием судна буксиром (судно на заднем плане, на переднем плане буксир)

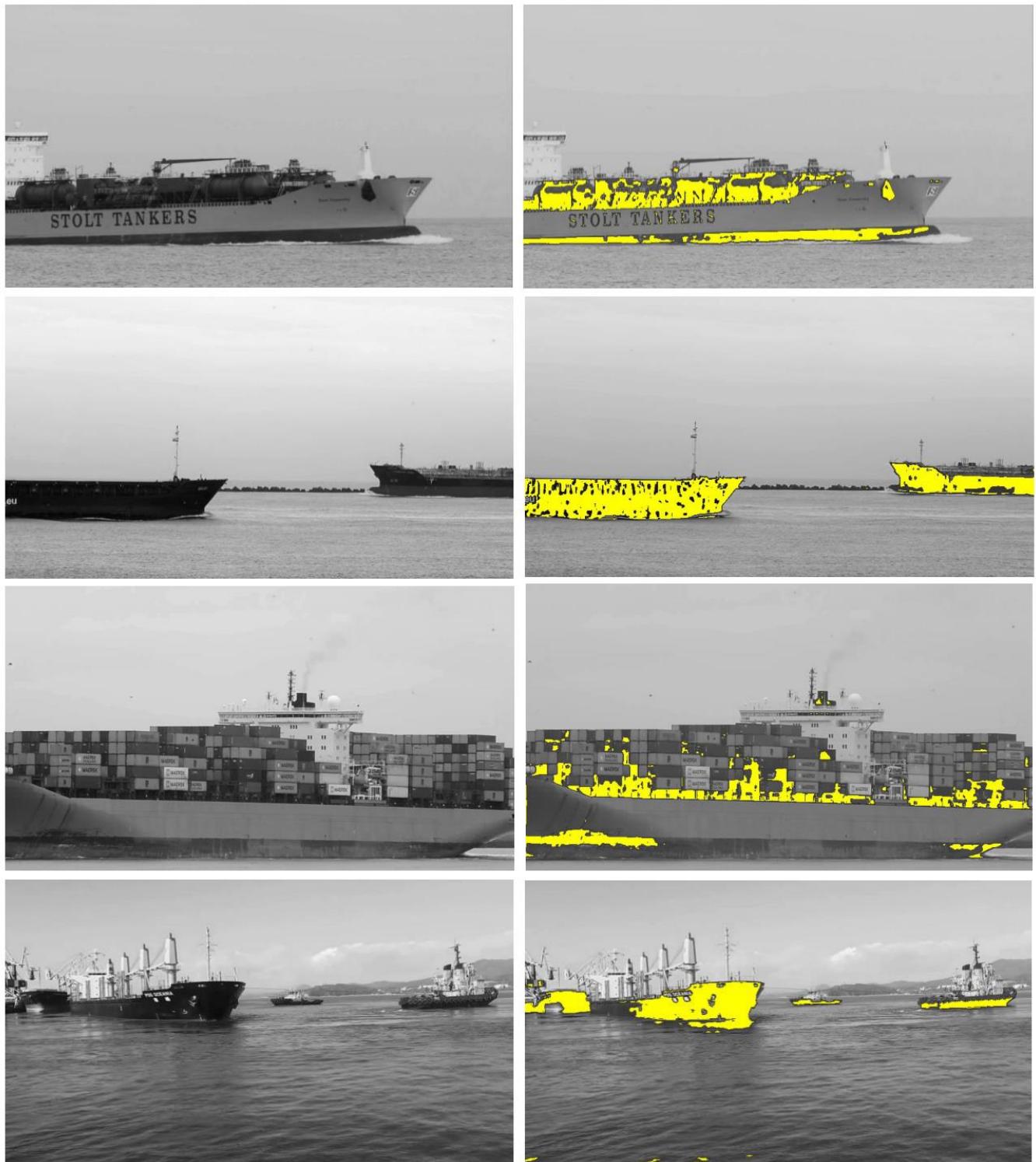


Рис. 2-7 Визуализация разности соседних кадров на примере судов разного размера, с разной скоростью движения и на различных расстояниях от причала

Группы пикселей, выделенные на первом этапе, двигаются с разной скоростью:

- часть пикселей не сдвигается дальше своего участка изображения (как правило, эти области принадлежат таким объектам как, бакены, буи, волны) и характер их движения определяется как движение в окрестности заданного центра;
- некоторые пиксели пропадают от кадра к кадру и появляются снова со смещением;
- и пиксели, которые смещаются постоянно и имеют чётко отслеживаемую траекторию движения.

Вторым этапом является выделение связных компонент (контуров) [54], их анализ и составление карты движущихся участков изображения.

Для определения контуров используется алгоритм топологического структурного анализа [55]. Программная реализация алгоритма взята из библиотеки OpenCV 4.7.0. Под контуром подразумевается кривая, соединяющая все непрерывные точки вдоль границы белого объекта на чёрном фоне. Извлекаются только внешние контуры и сохраняются конечные точки линий, образующих контур (Рис. 2-8). Внутренние контуры не задействуются.



Рис. 2-8 Визуализация контурного анализа

Найденные контуры сортируются от большего к меньшему и часть из них сохраняются для дальнейшего анализа. Для каждого контура из сохранённых рассчитывается средневзвешенное значение яркости пикселей внутри этого контура, а также центр масс [56], ширина и высота контура (на основе минимальной прямоугольной области, охватывающей контур).

На каждом последующем кадре список из контуров анализируется.

Обработка каждого нового кадра начинается:

- с нормализации значений яркости пикселей кадра в диапазон [0;1];
- бинаризации, описанной выше по тексту;
- вычитания текущего кадра из предыдущего.

Поиск контуров выполняется на изображении разности двух соседних кадров, затем:

- контуры сортируются от большего к меньшему;
- вычисляются средневзвешенные значения яркости пикселей внутри контуров, центры масс контуров, а также ширина и высота каждого контура;
- контуры сравниваются со списком сохранённых контуров на предыдущей итерации алгоритма.

Сравнение контуров:

- Рассчитывается допустимая величина сдвига по X, Y центра масс контура. Величина сдвига составляет 40% от ширины и высоты минимальной прямоугольной области, охватывающей контур.
  - а. Если контур попал в область, рассчитанную на предыдущем шаге, сравниваются размеры контуров. Допустимая разница в размерах контуров составляет 30%.
- Иначе контур идентифицируется как новый.

Процентные соотношения и другие величины, указанные в работе подобраны для использования в задаче позиционирования морского крупнотоннажного судна относительно причала. В задачах позиционирования других крупногабаритных площадных объектов (например, ж/д вагонов, грузовых автомобилей) следует выполнить подбор значений указанных величин в соответствии со спецификой задачи (размерами объекта, условиями работы измерителей).

С момента определения контуров в кадре, составляется карта движущихся участков изображения и обновляется с каждой новой итерацией программной реализации алгоритма (далее алгоритма).

Каждую итерацию алгоритма учитывается количество кадров, прошедшее с момента запуска алгоритма, когда контур идентифицировался в кадре, что позволяет исключить случайно попавшие в кадр движущиеся объекты (птиц, людей).

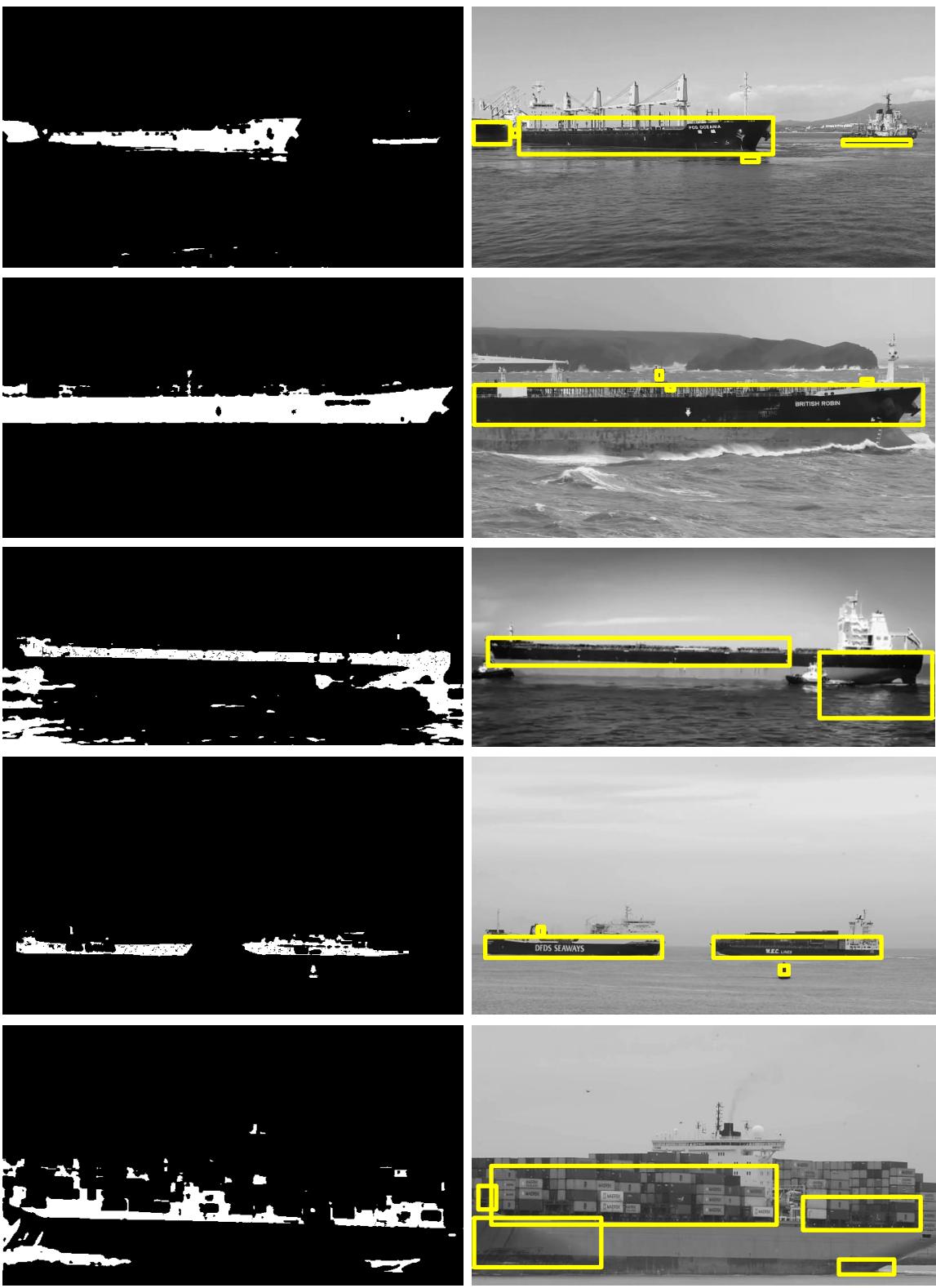


Рис. 2-9 Примеры движущихся областей изображения (слева) и движущихся областей, потенциально принадлежащих судну и его палубным конструкциям (справа)

Начиная с 1080 кадра, т.е. 15 секунд при скорости съёмки 72 кадра в секунду как контур определяется и находится в движении, предполагается, что контур

принадлежит судну и его палубным конструкциям. Визуализация работы алгоритма представлена на Рис. 2-9.

В параллельном потоке вычислений область, которая охватывает контур, разбивается на объекты, если контур достаточно велик, либо принимается за единичный объект и начинает отслеживаться. Под объектами понимаются участки изображения пригодные для отслеживания разработанным методом, приведённым в главе 3.

Время работы программной реализации алгоритма определения движения в кадре на языке Python версии 3.10.10 составляет в среднем 10.1 мс на 1000 кадров ( $640 \times 360$ ) при измерении времени функцией Win32 QueryPerformanceCounter, которая возвращает часы, прошедшие с момента первого вызова этой функции, в виде числа с плавающей запятой.

Порядок определения движения в кадре включает два этапа:

- этап сбора информации о присутствующих в кадре движущихся объектах и выбор объекта отслеживания: обрабатывается каждый кадр в серии из 4320 кадров (общее время обработки серии 60 секунд при частоте 72 кадра в секунду);
- этап уточнения выбранного объекта для контроля выхода объекта за границы кадра, изменения скорости, возможного частичного перекрытия объекта или изменение его формы: обрабатывается каждый кадр в серии из 1080 кадров (общее время обработки серии 15 секунд при частоте 72 кадра в секунду) с частотой 1 раз в 2 минуты.

## 2.2 Метод выбора объектов отслеживания

К этапу выбора объектов отслеживания уже вычислены подвижные области и координаты областей, потенциально принадлежащие судну и его палубным конструкциям (Рис. 2-10). Далее эти области разбиваются на отдельные объекты, либо принимаются за единичные объекты и начинают отслеживаться.

Выбранные объекты будут отслеживаться и анализироваться с целью расчёта продольного и вертикального смещения корпуса судна относительно причала. Под объектами в этом параграфе понимаются участки изображения пригодные для отслеживания разработанным методом, приведённым в главе 3. Для удобства упоминания метод назван Adaptive Frequency Tracker (AFT).

AFT является методом машинного обучения, в основе которого лежит обучение в режиме реального времени путём изменения параметров и накопления данных в условиях постоянно изменяющейся среды. В основе разработанного

метода лежит работа в частотной области и накопление данных об объекте, таких как поворот и изменения масштаба.

Краткое описание алгоритма приводится для понимания способа выбора объектов отслеживания:

1. Расчёт для каждого объекта фильтр-функции, представляющей собой матрицу коэффициентов характерных особенностей объекта в частотной области:
  - a. к каждому объекту (области изображения) после обработки применяется двумерное дискретное преобразование Фурье;
  - b. в цикле создаётся набор из  $n$  спектров изображений, построенных на базе изображения объекта со случайным поворотом в некотором диапазоне;
  - c. рассчитываются компоненты фильтр-функции. Для оценки степени корреляции используется свёртка функций;
2. Отслеживание объекта:
  - a. перевод части изображения, предположительно содержащей объект, в частотную область;
  - b. умножение матрицы частот фильтра на матрицу частот области изображения, где ожидается наличие отслеживаемого объекта;
  - c. применение обратного дискретного преобразования Фурье к произведению амплитудно-частотных спектров;
  - d. поиск координат пикселей с максимальной величиной яркости изображения, при этом, если есть несколько максимумов, то за новый центр сместившегося объекта принимается центр масс этих значений.
3. Дополнение фильтр-функции информацией об объекте по мере работы алгоритма:
  - a. к изображению объекта применяются те же преобразования, что и на этапе создания фильтр-функции;
  - b. применяется двумерное дискретное преобразование Фурье;
  - c. амплитудно-частотный спектр изображения объекта суммируется с компонентами фильтр-функции.

На этапе отслеживания объектов, каждое изображение подвергается обработке, которая повышает точность определения положения объекта:

1. Высокие частоты изображения подавляются фильтром Гаусса;
2. Яркость тёмных пикселей изображения относительно светлых увеличивается логарифмированием;
3. Изображение нормализуется методом Z-оценки, для сглаживания выбросов значений яркости пикселей;

4. Окном Ханна (Хеннинга) значения яркости пикселей изображения уменьшаются от центра к краю до нуля на границах изображения.

Такие же яркостные преобразования используются на подвижных участках изображения при выборе объектов отслеживания.

Так как в основе метода AFT лежит работа с изображениями в частотной области, выбранные объекты отслеживания должны иметь характеристики, которые прослеживаются в амплитудно-частотном спектре, такие как:

- контуры идентификационных знаков или конструктивных особенностей судна, включая особенности палубных конструкций;
- видимые границы коррозионного рисунка борта судна;
- контрастные области.

Выбор объектов отслеживания включает последовательность действий:

1. Подвижные области изображения принимаются за отдельные регионы и анализируются независимо от полного изображения. Дальнейшие действия, описанные ниже по тексту, проводятся в цикле с каждым отдельным подвижным регионом изображения.



Рис. 2-10 Пример подвижных регионов изображения

2. Высокие частоты изображения подавляются фильтром Гаусса, яркость тёмных пикселей изображения относительно светлых увеличивается логарифмированием:

$$x = \log(n + 1) \quad (2)$$

где  $n$  – матрица яркости пикселей изображения.



Рис. 2-11 Пример подвижных регионов изображения до обработки (слева) и после обработки (справа)

3. Значения пикселей региона умножаются на матрицу коэффициентов (по краям изображения пиксели зеркально отражаются):

$$t = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Это позволяет выделить границы на изображении (Рис. 2-12, Рис. 2-13).

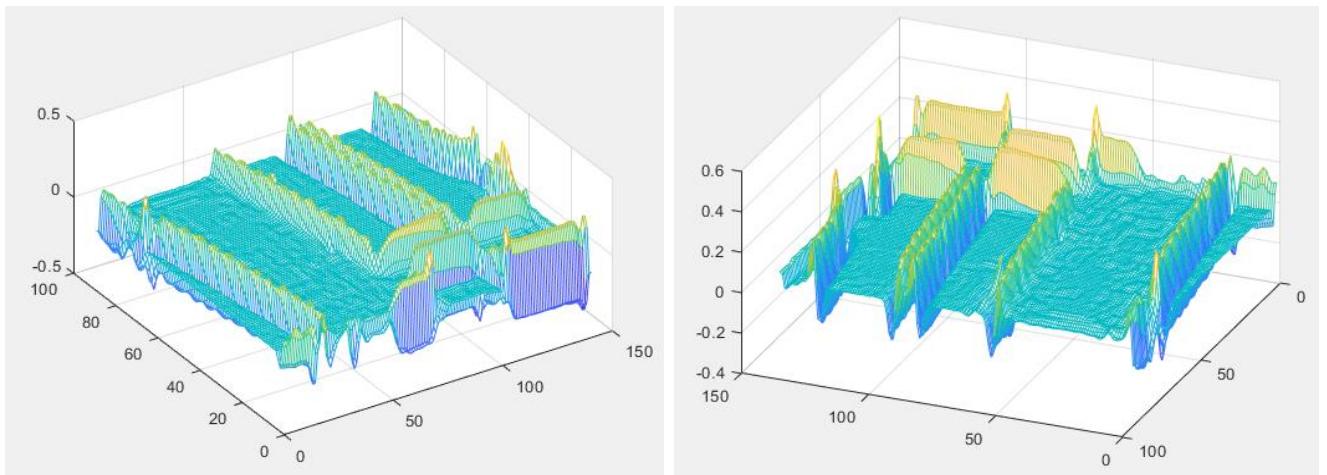


Рис. 2-12 Визуализация в разных проекциях яркости пикселей региона после перемножения с матрицей коэффициентов



Рис. 2-13 Пример региона до (слева)  
и после перемножения с матрицей коэффициентов (справа)

4. Применяется пороговое преобразование со значением порога 10% от максимума яркости пикселей региона (Рис. 2-14, Рис. 2-15).



Рис. 2-14 Пример региона до (слева)  
и после порогового преобразования (справа)

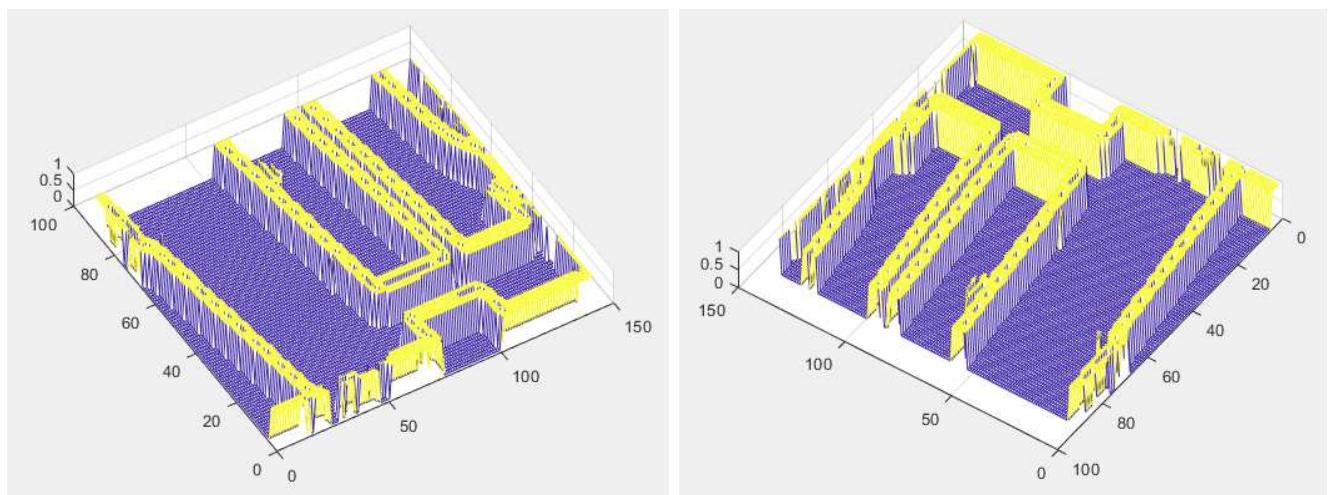


Рис. 2-15 Визуализация в разных проекциях яркости пикселей региона  
после порогового преобразования

5. Анализируется размер региона.

а. Минимально допустимый размер объекта отслеживания  $30 \times 30$  пикселей. Объекты меньшего размера методом AFT отслеживаются с меньшей точностью (подробнее метод описан в главе 3).

Соответственно:

- регион меньшего размера, чем  $30 \times 30$  отбрасывается;
- регион с размерами в диапазоне от 30 пикселей до 72 пикселей по высоте и ширине включительно принимается за единичный

объект, если его характеристики позволяют. В противном случае он будет также отброшен.

- b. Регион, превышающий 72 пикселя по ширине и высоте, разбивается на части  $40 \times 40$  пикселей. Части региона, примыкающие к нижней и правой границам, расширяются до границ региона (Рис. 2-16).

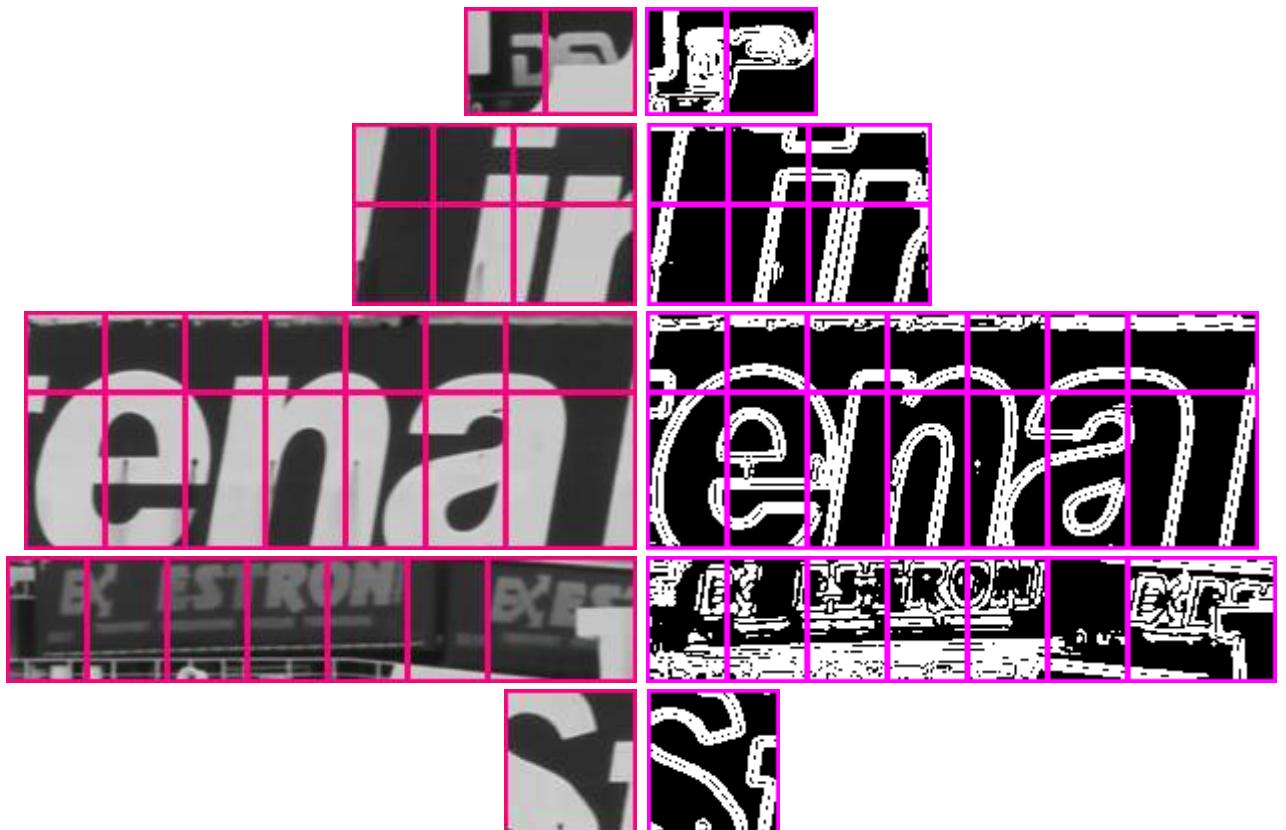


Рис. 2-16 Пример регионов, разделённых на части:  
регионы после порогового преобразования, разделённые на части (справа);  
регионы до обработки, с такой же разметкой (приводятся для наглядности)  
(слева)

На рисунке ниже приводится пример подвижного региона после полного цикла обработки, включающего: сглаживание высоких частот фильтром Гаусса, увеличение яркости тёмных пикселей относительно светлых логарифмированием, умножение значений пикселей на матрицу коэффициентов, порогового преобразования со значением порога 10% от максимума яркости пикселей региона и разделения региона на части, для их дальнейшего анализа.



Рис. 2-17 Пример региона ( $90 \times 141$ ) после полного цикла обработки

Размеры частей, на которые разбивается регион зависят:

- от дистанции между судном и причалом (на разных дистанциях судно занимает разную часть кадра);
- от количества одновременно отслеживаемых объектов (измерительный комплекс работает в реальном времени, а значит величины смещения должны рассчитываться с минимальной задержкой).

Значение в 30 пикселов минимально, максимальный размер зависит от мощности аппаратной части измерителя.

6. Анализируется каждая часть региона:

- a. Значения на краях изображения сводятся к нулю окном Ханна (Хеннинга) подобно принципу обработки изображений в методе AFT (Рис. 2-19) [57].

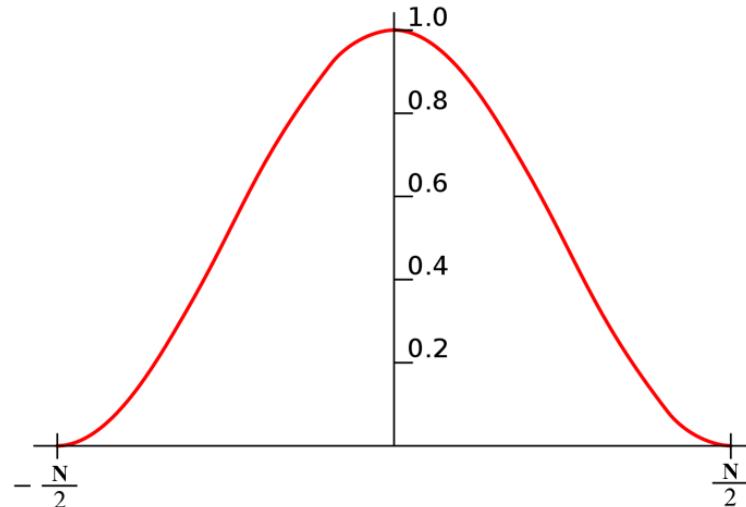


Рис. 2-18 График оконной функции Ханна (Хеннинга)

$$w(k) = 0.5 \times \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi k}{N-1}\right)\right), \quad k = -\frac{N}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N}{2} \quad (4)$$

где  $N$  – размер окна.



Рис. 2-19 Пример частей региона до (слева) и после обработки каждой части региона окном Ханна (Хеннинга) (справа)

- b. Рассчитывается разница в процентном соотношении между количеством чёрных и белых пикселей.

Белые пиксели изображения – возможные границы идентификационных знаков, палубных конструкций, коррозионного рисунка, контрастные зоны в окраске корпуса судна.

Части регионов, в которых процент белых пикселей находится в диапазоне от 25% до 65% от общего числа пикселей, принимаются за объекты отслеживания и передаются в метод АФТ (Рис. 2-20). По результатам испытания программной реализации алгоритма отслеживания объектов, пороговые значения 25% и 65% показали наилучший результат: области, выбранные в соответствии с этим критерием отслеживались с наибольшей точностью, т.е. диапазоны смещения центра объекта от начального положения были минимальны.



Рис. 2-20 Части регионов, в которых процентное соотношение белых пикселей в диапазоне от 25% до 65% от общего количества пикселей, и которые будут приняты за объекты отслеживания



Рис. 2-21 Части регионов, в которых процентное соотношение белых пикселей от общего количества пикселей составляет до 25% (сверху) и от 65% (снизу), и которые будут отброшены

Методом AFT начинают отслеживаться от 5 до 50 объектов одновременно. В процессе обработки первой последовательности кадров отбрасывается часть объектов. Отбрасываются те объекты, которые быстро меняют своё положение. Это означает, что объект выбран неверно, характеристики объекта слабо выражены и метод AFT отслеживает его с точностью, не соответствующей требуемой. Остается от 5 до 20 основных объектов в главной группе и 10 запасных, на случай замены объектов из главной группы. Подробнее об алгоритме анализа траектории объектов, об особенностях выполнения расчётов вертикального и продольного смещения, скорости смещения написано в 4 главе.



Рис. 2-22 Пример объектов, выбранных для дальнейшего отслеживания методом AFT

## 2.3 Обсуждение результатов

Представленные в этой главе методы определения движения в кадре и выбора объектов отслеживания работают в содержащих неопределённость условиях:

- условия съёмки (яркое солнце, облачность, осадки);
- разнообразие форм, палубных конструкций, рисунка на корпусах судов (нанесённого вручную и сформировавшегося в результате коррозионных и других физических процессов);
- различные скорости и траектории движения судов;
- разнообразие движущихся объектов, попадающих в кадр (другие суда, плавучие знаки, случайно попавшие в кадр птицы и насекомые);
- условия штатных и нештатных ситуаций в процессе автономной работы измерителей.

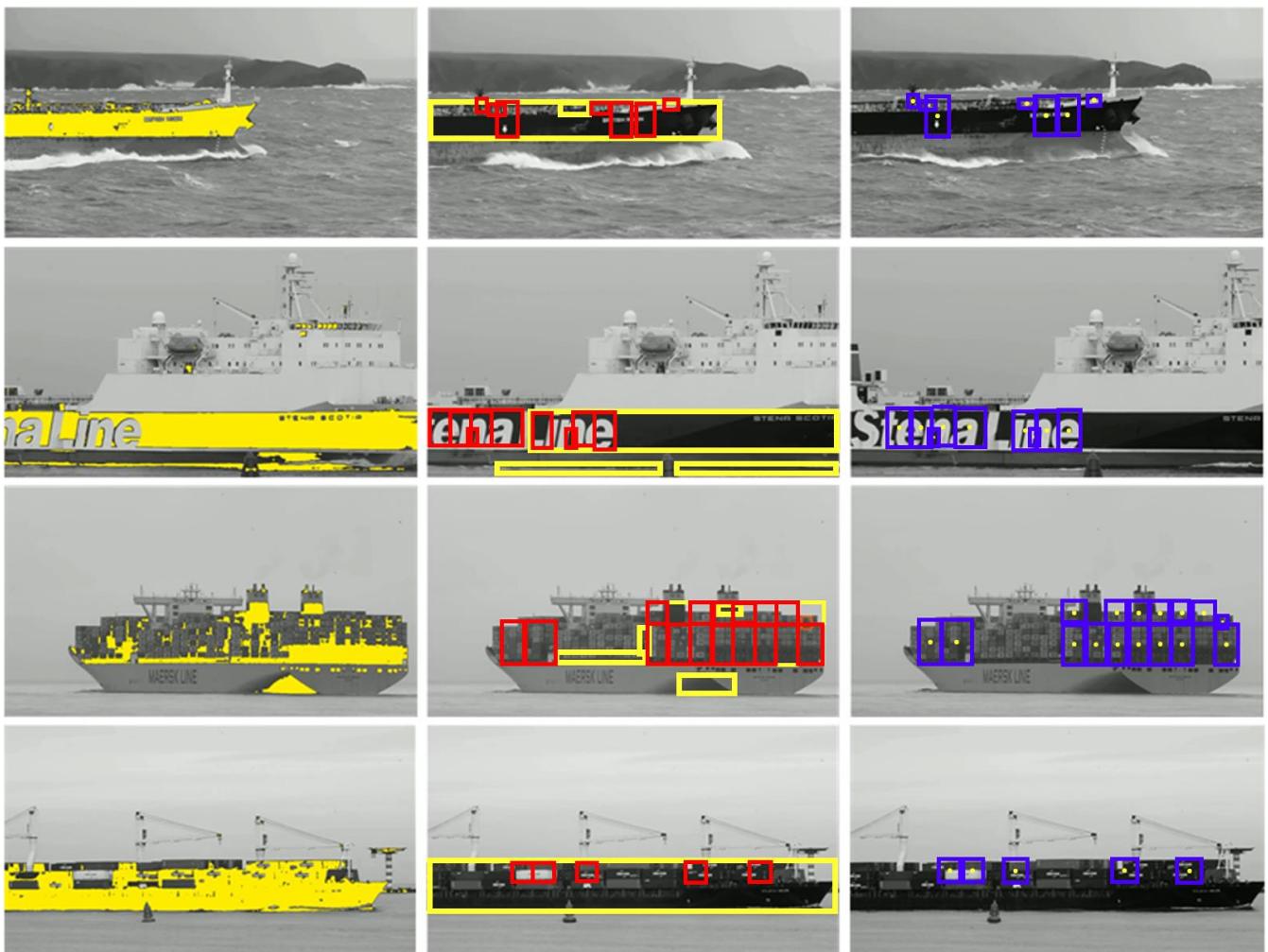


Рис. 2-23 Визуализация работы алгоритмов определения движения в кадре и выбора объектов отслеживания: сегментация подвижных областей изображения (слева), выбор объектов отслеживания (по центру), объекты пригодные для отслеживания методом AFT (справа)

Использование в работе готовых программных реализаций некоторых алгоритмов [58, 59, 60] (например, алгоритмы оптического потока, кластеризации) или алгоритмов в основе которых лежит случайный выбор объектов отслеживания, осложняется подбором параметров, непредсказуемостью результатов работы и ложными срабатываниями, что было подтверждено в ходе испытаний на тестовой выборке видеофайлов, содержащих более чем 50 вариантов подходов и швартовок судов к причалу.

Методы определения движения в кадре и выбора объектов отслеживания, представленные в этой главе, позволяют решить задачу позиционирования объектов, таких как морские крупнотоннажные суда, в условиях автономной работы оптических измерителей.

# Глава 3. Разработка метода отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту

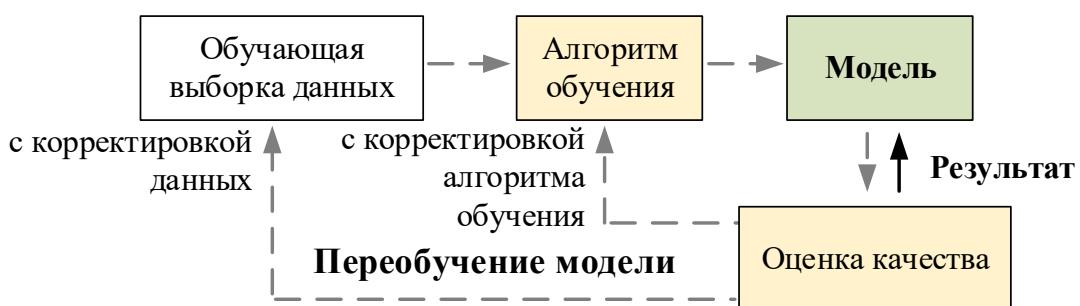
Материалы данной главы опубликованы в работах [63, 76].

## 3.1 Метод отслеживания объектов

Разработанный метод отслеживания объектов является адаптивным методом машинного обучения, в основе которого лежит обучение в режиме реального времени путём изменения параметров и накопления данных в условиях постоянно изменяющейся среды, что является преимуществом по сравнению с пакетными методами машинного обучения, в которых необходимо обучать модель с нуля при получении новых данных [61, 62].

### Пакетный метод обучения (Traditional Batch Learning)

#### Этап обучения



#### Этап вывода



### Обучение в реальном времени (Online Machine Learning)

#### Этап обучения и вывода

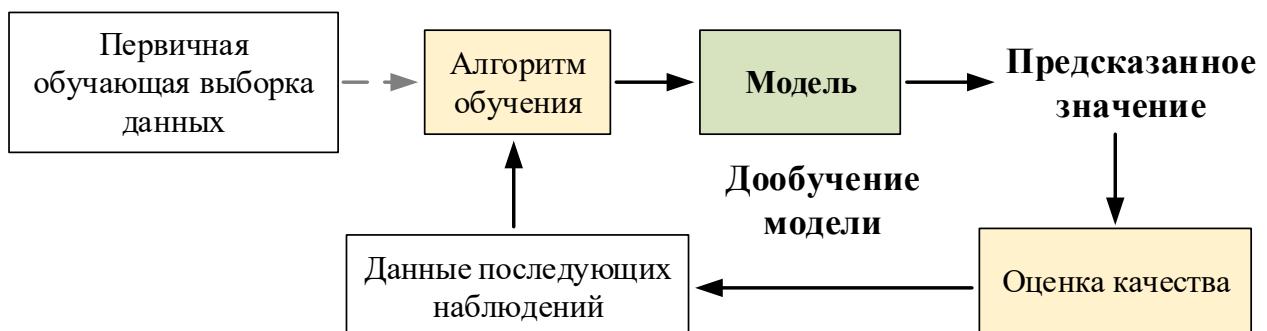


Рис. 3-1 Общее схематичное представление процессов пакетного метода машинного обучения и метода машинного обучения в реальном времени

Методы обучения в реальном времени более эффективны в программно-аппаратных комплексах, в которых данные изменчивы и поступают с высокой скоростью. Как например в системах компьютерного зрения, используемых для анализа окружающей обстановки в режиме реального времени.

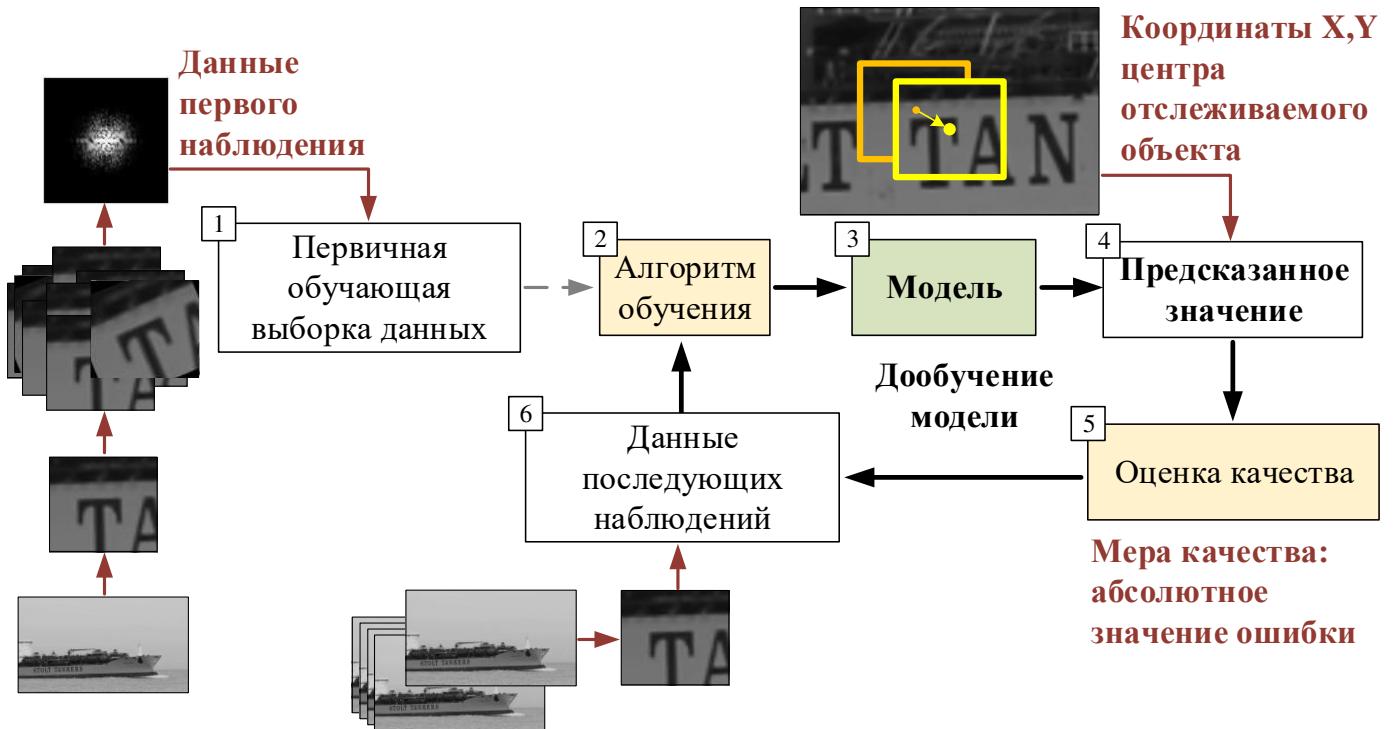


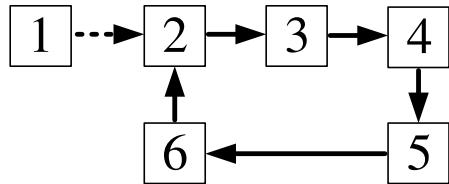
Рис. 3-2 Общее схематичное представление процессов разработанного метода отслеживания объектов

Разработанный метод выше и ниже по тексту работы для удобства упоминания назван Adaptive Frequency Tracker (AFT) [63].

Разработанный метод отслеживания объектов (Рис. 3-2) включает шесть этапов, пять из которых цикличны (Рис. 3-3):

- 1 – этап формирование первичной обучающей выборки;
- 2 – этап обучения;
- 2 – этап создания модели;
- 3 – этап предсказания искомого значения;
- 4 – этап оценки качества;
- 5 – этап сбора данных последующих наблюдений.

Первая итерация алгоритма



Последующие итерации алгоритма

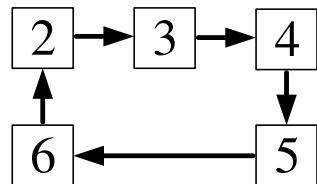


Рис. 3-3 Последовательность выполнения этапов программной реализации разработанного метода отслеживания объектов

Алгоритм обучается на основе выборки данных, сформированной из одного единственного наблюдения, для выполнения задачи предсказания данных и меры качества, выраженной в вычислении абсолютного значения ошибки. С каждой итерацией алгоритма, обучающая выборка данных дополняется новыми данными наблюдений. Модель, представляющая из себя функцию со множеством допустимых значений параметров, на каждой итерации дообучается.

Первичная обучающая выборка данных формируется на основе первого наблюдения – выбранного объекта отслеживания (участка изображения). После ряда пространственных преобразований над изображением объекта, формируется набор из  $n$  изображений. Каждый элемент выборки (прецедент) представляет собой пару «объект, ответ», где объектом является участок изображения, а ответом – координаты центра отслеживаемого объекта. По мере работы алгоритма, с каждой новой итерацией, выборка данных дополняется парой «объект, ответ», где объектом является участок изображения относительно новых предсказанных координат центра объекта, а ответом – предсказанные координаты центра этого объекта.

В основе представленного метода лежит работа в частотной области и накопление данных об объекте, таких как поворот и изменения масштаба. Одновременно отслеживается несколько объектов – подвижных участков изображения.

Для каждого отслеживаемого объекта создаётся фильтр-функция, спектр которой представляет собой набор данных, усреднённых определённым образом. На каждой итерации алгоритма, по мере накопления данных, фильтр-функция дополняется. Для оценки степени корреляции используется свёртка функций.

Все этапы процесса обработки и накопления данных верифицируемы, что позволяет гарантировать значение точности измерений в определённом диапазоне.

Объекты отслеживаются с целью определения величины смещения. По величине смещения объекта на изображении рассчитывается величина смещения физического объекта в пространстве (например, величины смещения судна относительно причала по вертикали и горизонтали в метрах).

В процессе работы алгоритма добавляются новые объекты, т.к. судно приближается к причалу, некоторые объекты выходят за границы кадра и перестают отслеживаться.



Рис. 3-4 Изображение фрагмента борта судна и направления координатных осей изображения (Н – высота изображения, W – ширина изображения)

Объектами отслеживания становятся все чётко различимые детали корпуса судна (в той части кадра, которая определена как борт судна): коррозионная окраска, сварочные швы, идентификационные знаки и т.д. Метод выбора объектов приведён в параграфе 2.2.

Размер фрагмента будет равным степени двойки (2, 4, 8, 16, 32 и т. д.) или будет являться произведением 2, 3 и 5 (например,  $300 = 5 \times 5 \times 3 \times 2 \times 2$ ) для увеличения производительности некоторых немонотонных функций (например, двумерного дискретного преобразования Фурье), а также для векторизованных вычислений.

Границы фрагмента изображения выбираются относительно объекта таким образом, чтобы центр объекта отслеживания совпадал с центром фрагмента изображения, содержащего этот объект.

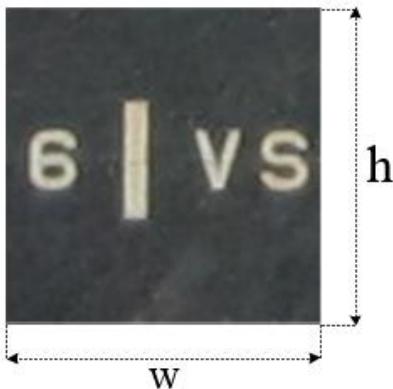


Рис. 3-5 Изображение идентификационных знаков на борту судна  
( $h$  – высота фрагмента изображения,  $w$  – ширина фрагмента изображения)

Для каждого объекта рассчитывается фильтр-функция (также называемая фильтром или передаточной функцией фильтра), которая представляет собой матрицу коэффициентов характерных особенностей объекта в частотной области. Как например, диагональные составляющие объекта в амплитудно-частотном спектре, которые будут соответствовать контурам объекта, проходящим примерно под 90 градусов (Рис. 3-6).

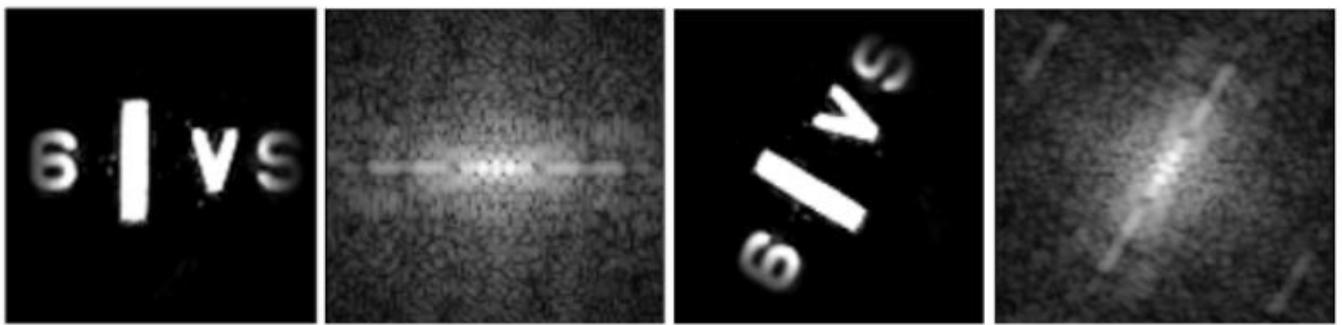


Рис. 3-6 Пара изображений слева – изображение объекта и его Фурье-спектр, пара изображений справа – изображение повернутое на 60 градусов и его Фурье-спектр

Все амплитудно-частотные спектры, представленные в работе, изображаются после логарифмического преобразования, улучшающего видимость деталей. А также со сдвигом низких частот в центр изображения.

Фильтрация в частотной области заключается в изменении Фурье-образа (Фурье-спектра) изображения и последующем выполнении обратного преобразования Фурье для получения обработанного результата.

Фильтр-функция по мере работы алгоритма дополняется информацией об объекте (изменение формы и наклона объекта при повороте судна, частичное перекрытие объекта (например, буксиром или швартовом), частичный выход объекта за границы кадра и т.д.):

- Изображение переводится в оттенки серого цвета и нормализуется в диапазон [0;1]:

$$f_n(x, y) = \frac{f(x, y) - \min(f(x, y))}{\max(f(x, y)) - \min(f(x, y))} \quad (5)$$

где  $f(x, y)$  – матрица яркости пикселей изображения,  $f_n(x, y)$  – матрица яркости пикселей нормализованного изображения.

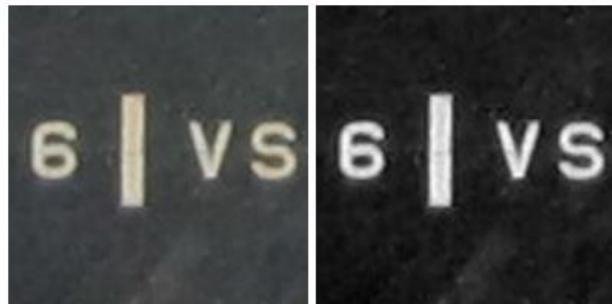


Рис. 3-7 Исходный фрагмент изображения (слева)  
и результат перевода в оттенки серого и нормализации (справа)

- Далее изображение сглаживается фильтром Гаусса.

Обработка изображений в пространственной области представляет собой прямое манипулирование пикселями изображения [64, 65]. Для сглаживания фильтром Гаусса в пространственной области используется матрица свёртки (матрица коэффициентов), которая заполняется в соответствии с нормальным распределением и умножается на значения пикселей изображения для получения некоторой степени размытия этого изображения.

Используя методы прямого манипулирования пикселями [66] изображения сложность операции сглаживания будет квадратичной.

Согласно двумерной теореме о свёртке [67]: свёртка матриц в пространственной области – это перемножение Фурье-спектров этих матриц в частотной области. Таким образом, можно снизить сложность алгоритма с квадратичной –  $O(m^2 n^2)$  до квазилинейной –  $O(mn \times \log mn)$ :

- применить быстрое преобразование Фурье к областям изображения;
- умножить их матрицы частот поэлементно;

- затем перевести результат обратно в пространственную область.

По размерам изображения строится координатная сетка:

$$X, Y = \text{meshgrid}(x, y) \quad (6)$$

$$X = \downarrow 480 \begin{cases} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & 639 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & \dots & 639 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{cases}$$

$$Y = \left\{ \begin{array}{l} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 2 & 2 & 2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 479 & & \end{array} \right.$$

К координатной сетке в зависимости от положения и размера отслеживаемого объекта применяется функция Гаусса, таким образом, чтобы пик гауссианы приходился на центр отслеживаемого объекта:

$$g(X, Y) = \exp \left( -\frac{(X - i)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(Y - j)^2}{\sigma_y^2} \right) \quad (7)$$

где  $g = g(X, Y)$  – гауссiana в матричной форме (таблично заданная функция),  $X, Y$  – координаты пикселей по размерам участка изображения,  $i, j$  – координаты центра отслеживаемого объекта,  $\sigma_x^2, \sigma_y^2$  – величины дисперсии по  $x, y$ .

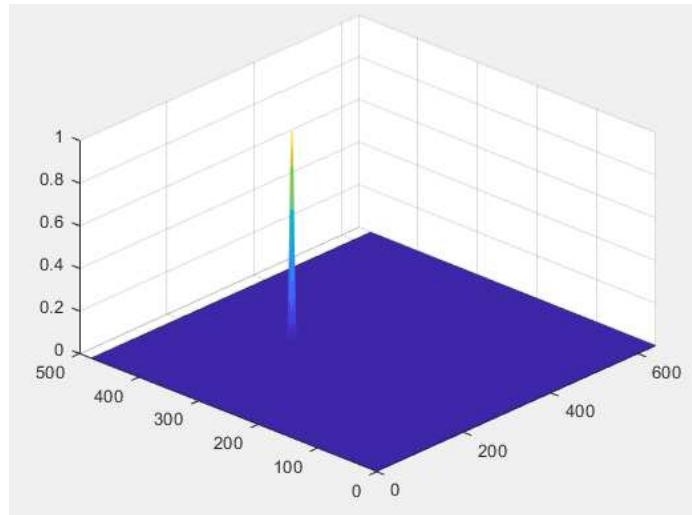


Рис. 3-8 Изображение, содержащее результат применения функции Гаусса к координатной сетке с учётом координат отслеживаемого объекта

Изображение обрезается по размеру отслеживаемого объекта и к нему применяется двумерное дискретное преобразование Фурье:

$$F(g) = \mathcal{F}(g) \quad (8)$$

где  $\mathcal{F}$  – оператор двумерного дискретного преобразования Фурье.

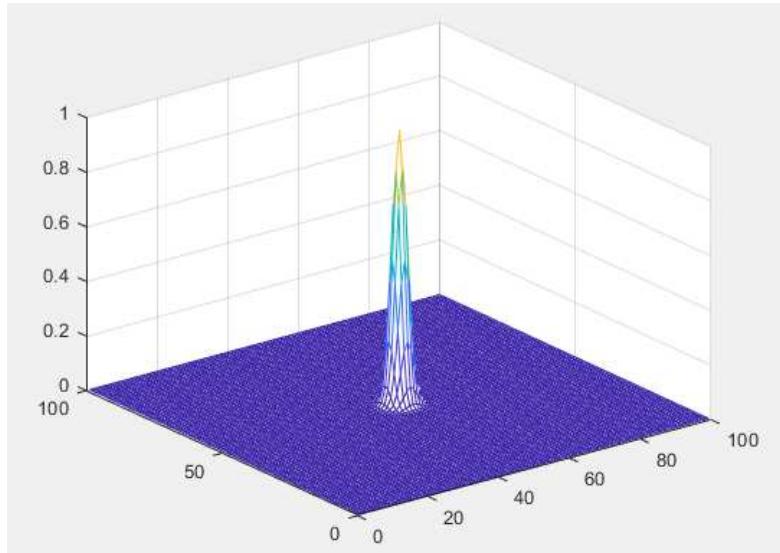


Рис. 3-9 Фрагмент изображения гауссианы по размеру отслеживаемого объекта

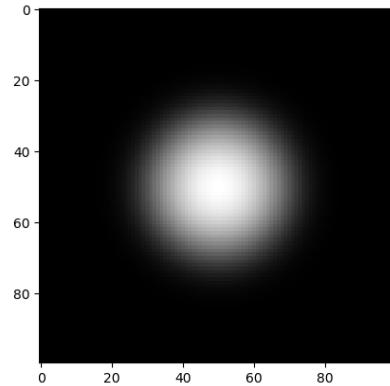


Рис. 3-10 Фурье-спектр изображения гауссианы

В частотной области сглаживание (размытие) достигается подавлением высоких частот, т.е. при помощи низкочастотной фильтрации [68]. Поэтому далее для сглаживания изображений матрицы частот изображений будут умножаться на матрицу частот двумерной гауссианы.

### 3.1.1 Создание первичной обучающей выборки данных и первичной модели

Первый этап метода – создание первичной обучающей выборки. Первичная обучающая выборка формируется на основе первого наблюдения – участка изображения, выбранного для отслеживания. Каждый элемент выборки (прецедент)

представляет собой пару «объект, ответ», где объектом является участок изображения, а ответом – координаты центра отслеживаемого объекта. Первичная обучающая выборка используется для первого предсказания координат сместившегося объекта. На каждой последующей итерации алгоритма обучающая выборка дополняется и используется для дообучения модели.

Все изображения составляющие выборку проходят ряд пространственных преобразований [69] (параграф 3.1.1.1).

Модель представляет собой функцию со множеством допустимых значений параметров. На каждой итерации алгоритма модель дообучается, что позволяет учесть изменения объекта отслеживания в кадре (изменение масштаба, поворот, частичное перекрытие). Этапы обучения и создания модели описаны в параграфе 3.1.1.2.

### 3.1.1.1 Обработка изображений для повышения точности определения объектов

Для повышения точности определения объектов на этапе формирования и дополнения обучающей выборки выполняется обработка изображений объекта, которая заключается в применении следующих матричных операций:

- Увеличение яркости тёмных пикселей изображения относительно светлых:

$$x = \log(n + 1) \quad (9)$$

где  $n$  – яркость пикселя изображения.

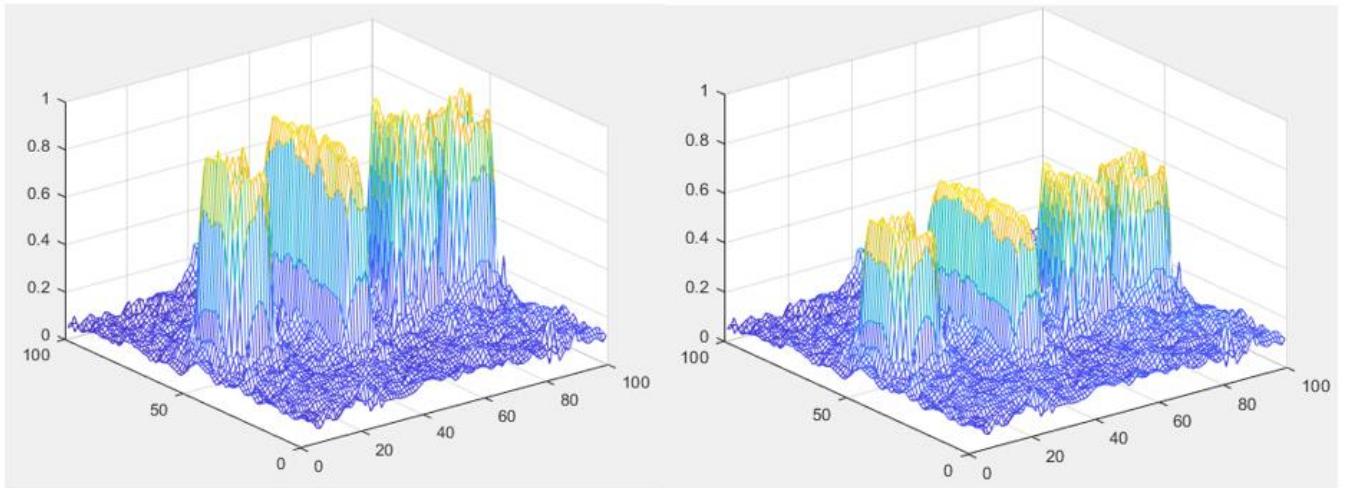


Рис. 3-11 Визуализация распределения яркости в пикселях изображения до (слева) и после логарифмирования (справа)

- Сглаживание выбросов значений яркости пикселей изображения нормализацией методом Z-оценки:

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma} \quad (10)$$

где  $x$  – значение пикселя, полученное в результате логарифмирования (на предыдущем шаге),  $\mu$  – среднее значение,  $\sigma$  – стандартное отклонение.

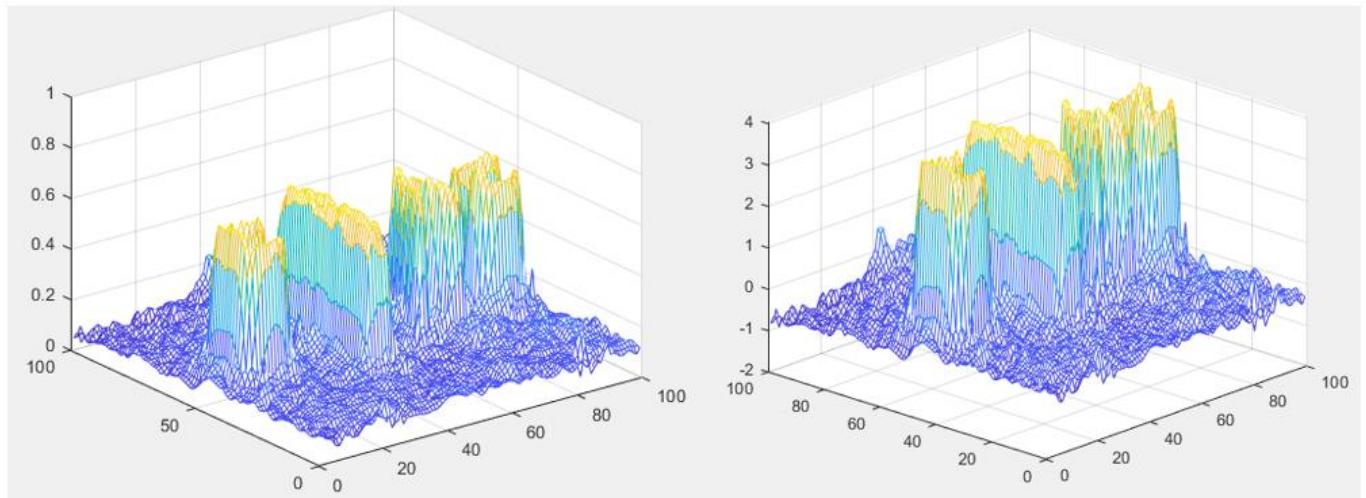


Рис. 3-12 Визуализация распределения яркости в пикселях изображения до (слева) и после нормализации методом Z-оценки (справа)

- Применение окна Ханна (Хеннинга) к изображению (плавное уменьшение значений яркости от центра к краю до нуля на границах изображения):

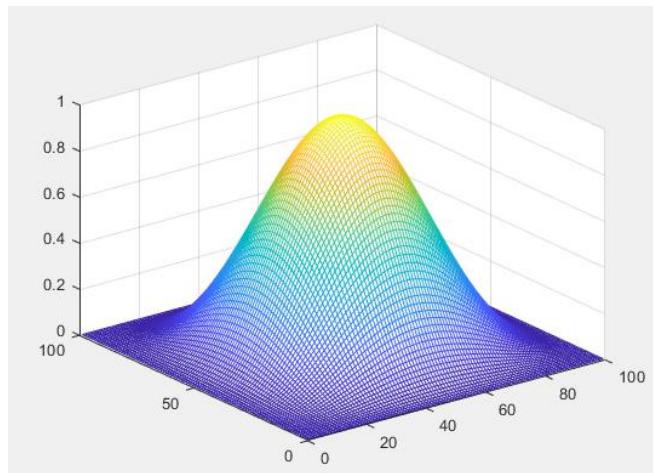


Рис. 3-13 График функции окна Ханна (Хеннинга)

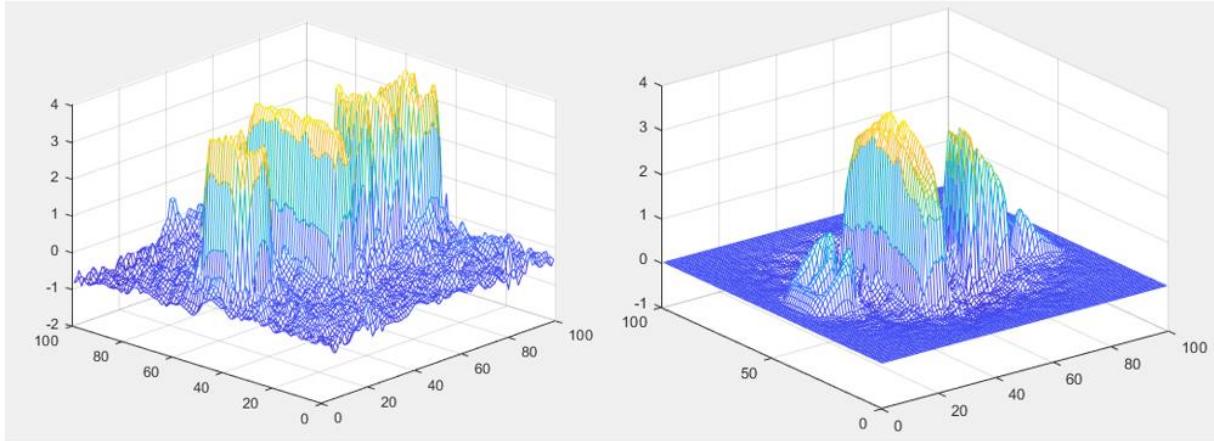


Рис. 3-14 Диаграмма яркости пикселей изображения до (слева) и после применения окна Ханна (Хеннинга) (справа)

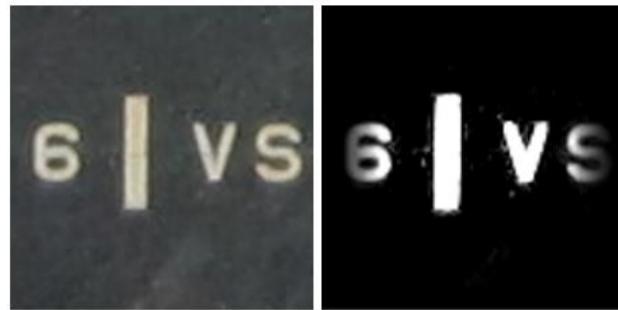


Рис. 3-15 Исходный фрагмент изображения (слева) и результат обработки (справа)

### 3.1.1.2 Расчёт компонент фильтр-функции

К обработанному изображению применяется двумерное дискретное преобразование Фурье:

$$F(u, v) = \mathcal{F}(f(x, y)) \quad (11)$$

где  $F(u, v)$  – матрица частот, в которой  $u, v$  – частоты изображения по осям  $x$  и  $y$ ,  $\mathcal{F}$  – оператор двумерного дискретного преобразования Фурье,  $f(x, y)$  – область изображения, содержащая объект отслеживания.

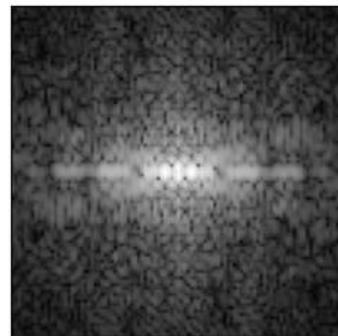


Рис. 3-16 Фурье-спектр обработанного изображения

Для оценки степени корреляции используется свёртка функций.

Компоненты фильтра рассчитываются по формулам:

$$A = F(g) \times \bar{F}(u, v), \quad B = N \times F(u, v) \times \bar{F}(u, v) \quad (12)$$

Где  $\times$  – операция поэлементного умножения матриц,  $F(g)$  – матрица частот двумерной гауссианы,  $F(u, v)$  – матрица частот изображения объекта,  $\bar{F}(u, v)$  – комплексно сопряжённая матрица частот изображения объекта (поворот изображения на 180 градусов),  $N$  – матрица 3% случайного импульсного шума,  $u, v$  – частоты изображения по осям  $x$  и  $y$ .

Использование матрицы 3% случайного импульсного шума позволяет учесть возможные эпизодические изменения яркости отслеживаемых участков изображения (объектов). Значение выбрано по результатам обработки экспериментальных данных.

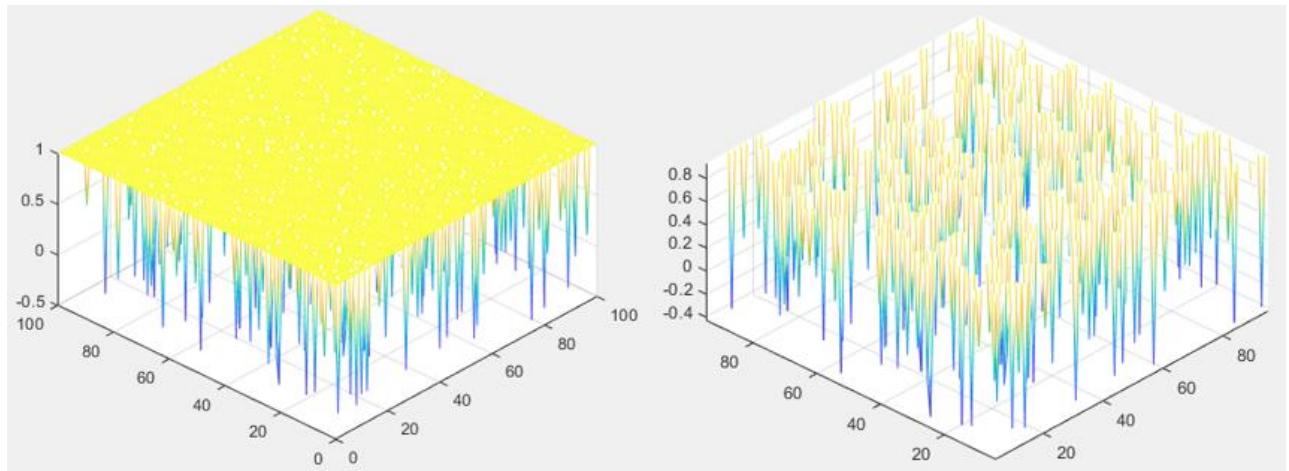


Рис. 3-17 Визуализация матрицы 3% случайного импульсного шума в разных срезах

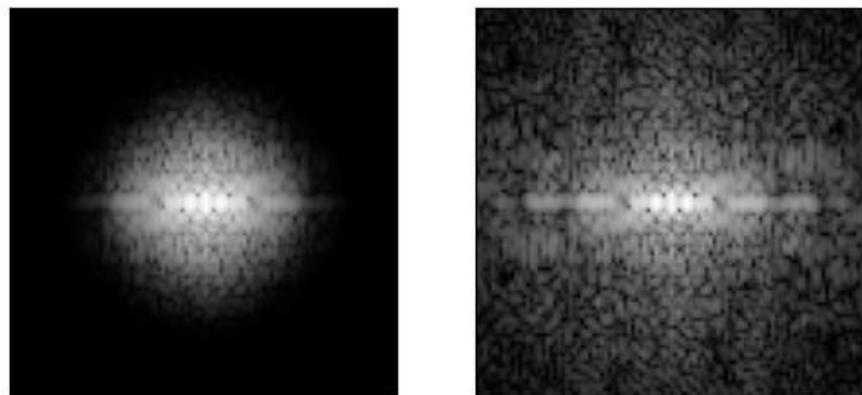


Рис. 3-18 Фурье-спектры  $A$  (слева) и  $B$  (справа)

Формируется первичная модель. В цикле матрицы  $A$  и  $B$  суммируются с  $n$  Фурье-спектрами обработанного изображения с поворотом на случайный угол в диапазоне [-20;20] градусов:

$$A = \sum_{i=1}^n F(g) \times \bar{F}_i(u, v), \quad B = \sum_{i=1}^n N \times F_i(u, v) \times \bar{F}_i(u, v) \quad (13)$$

где  $\times$  – операция поэлементного умножения матриц,  $F(g)$  – матрица частот двумерной гауссианы,  $F_i(u, v)$  – матрица частот изображения объекта,  $\bar{F}_i(u, v)$  – комплексно сопряжённая матрица частот изображения объекта (поворот изображения на 180 градусов),  $N$  – матрица 3% случайного импульсного шума,  $n$  – целое число, обозначающее количество изображений выборки для создания первоначальной фильтр-функции (например, 125),  $u, v$  – частоты изображения по осям  $x$  и  $y$ .

Диапазон поворота изображений от -20 до 20 градусов обусловлен скоростным режимом съёмки. Поворот объекта, находящегося перед камерой (морское судно, грузовой автомобиль, ж/д вагон и т.д.) составляет не более 10 градусов за время съёмки двух соседних кадров. Значение в 20 градусов выбрано с запасом.

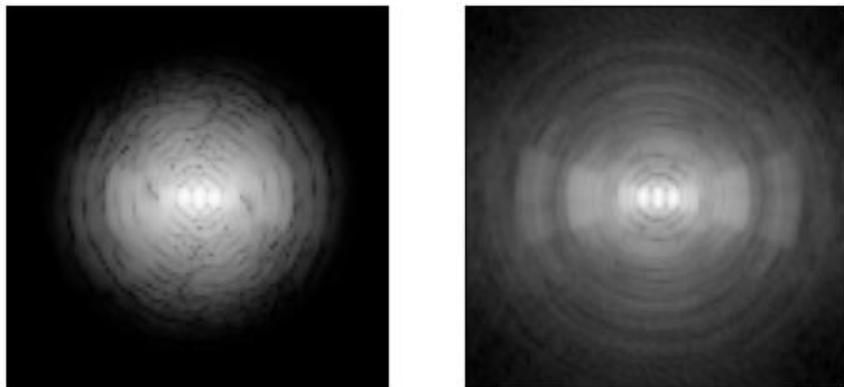


Рис. 3-19 Фурье-спектры  $A$  (слева) и  $B$  (справа)

Матрица  $A$  содержит сумму коэффициентов амплитудно-частотного спектра  $n+1$  обработанных изображений с результатами поворота изображений на произвольный угол в диапазоне [-20;20] градусов. Высокие частоты подавлены низкочастотным фильтром Гаусса.

Матрица  $B$  содержит сумму произведений матриц с комплексными и комплексно-сопряжёнными коэффициентами  $n+1$  обработанных изображений с результатами поворота изображений на произвольный угол в диапазоне [-20;20] градусов.

На этом этапе первичная модель готова. Далее объект отслеживается: предсказываются координаты центра сместившегося объекта. На основе данных последующих наблюдений (координаты отслеживаемого объекта на каждом новом кадре) модель дообучается путём суммирования фильтр-функции с новыми значениями.

Применив обратное преобразование Фурье к амплитудно-частотному спектру  $A$ , можно увидеть результат размытия поворотным движением исходного изображения, Фурье-образ которого используется для отслеживания объекта.

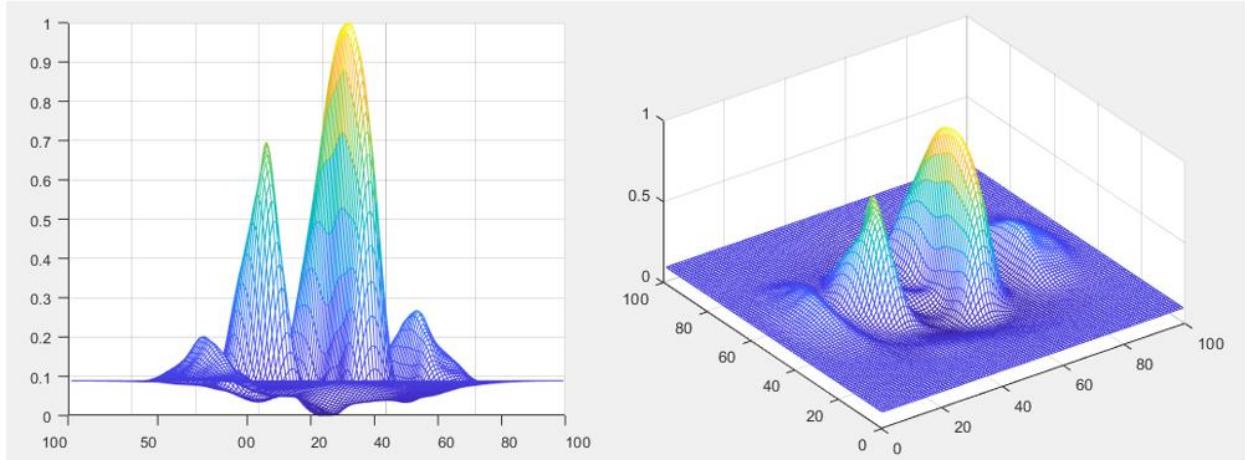


Рис. 3-20 Визуализация яркости пикселей изображения в пространственной области, соответствующего спектру  $A$

Применив обратное преобразование Фурье к амплитудно-частотному спектру  $B$ , можно увидеть результат размытия поворотным движением исходного изображения, Фурье-образ которого используется для отслеживания объекта.

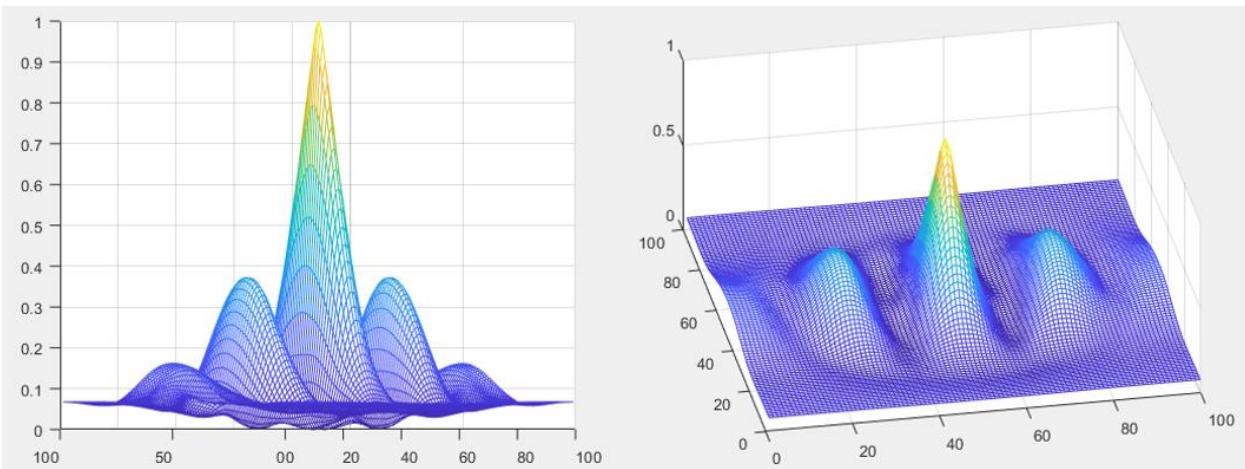


Рис. 3-21 Визуализация яркости пикселей изображения в пространственной области, соответствующего спектру  $B$

### 3.1.2 Предсказание искомого значения: отслеживание объекта

Со следующего кадра, полученного на вход алгоритмом, начинается отслеживание объекта – этап предсказания искомого значения:

- Берётся та же область изображения, которая использовалась на этапе создания компонент первичного фильтра. Предполагается, что на втором кадре объект сместился незначительно относительно положения на первом кадре.
- Изображение переводится в оттенки серого цвета, яркость тёмных пикселей относительно светлых увеличивается логарифмированием, изображение нормализуется методом Z-оценки и значения на краях изображения сводятся к нулю окном Ханна (Хеннинга).
- К обработанному изображению применяется двумерное дискретное преобразование Фурье:

$$F(u, v) = \mathcal{F}(f(x, y)) \quad (14)$$

где  $\mathcal{F}$  – оператор двумерного дискретного преобразования Фурье,  $F(u, v)$  – матрица частот изображения, где предположительно находится сместившийся объект.

- Далее рассчитывается фильтр-функция, которая является частным двух амплитудно-частотных спектров:

$$U = \frac{A}{B} \quad (15)$$

где  $A$  и  $B$  – компоненты фильтр-функции,  $U$  – результирующая фильтр-функция.

Фильтр-функция  $U$  рассчитывается для каждого нового кадра.

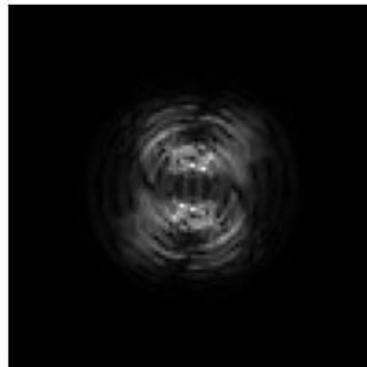


Рис. 3-22 Фурье-спектр фильтр-функции  $U$

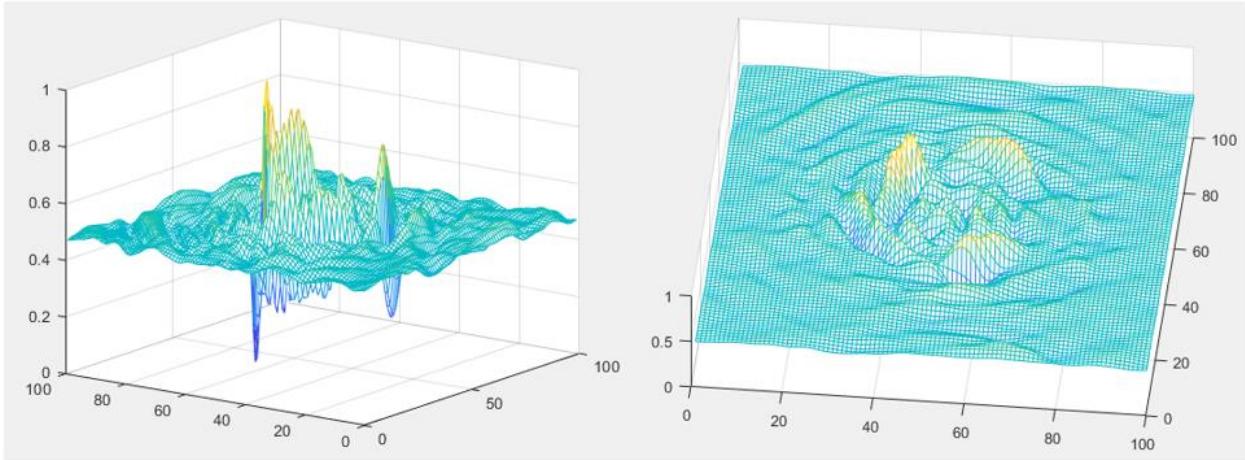


Рис. 3-23 Визуализация в разных проекциях яркости пикселей изображения в пространственной области, соответствующего спектру фильтра  $U$

- Матрица частот фильтра умножается на матрицу частот области изображения, где ожидается наличие отслеживаемого объекта:

$$\hat{F}(u, v) = U \times F(u, v) \quad (16)$$

где  $\times$  – операция поэлементного умножения матриц,  $U$  – фильтр-функция,  $F(u, v)$  – матрица частот изображения, где предположительно находится сместившийся объект,  $\hat{F}(u, v)$  – Фурье-спектр прогноза.

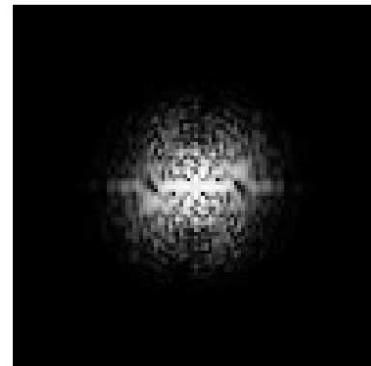


Рис. 3-24 Фурье-спектр  $\hat{F}(u, v)$

- Для постобработки Фурье-спектра прогноза применяется обратное дискретное преобразование Фурье к получившейся матрице  $\hat{F}(u, v)$ :

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}(F(u, v)) \quad (17)$$

- и нормализуется в диапазон  $[0; 1]$ .

- Выполняется поиск координат пикселей с максимальной величиной яркости изображения. За центр сместившегося объекта принимается центр масс этих значений, если они на одинаковом расстоянии от прошлых координат, иначе ближайший максимум становится новым центром.

Этап оценки качества заключается в определении качества предсказания искомого значения и выполняется путём вычисления абсолютного значения ошибки:

$$\Delta x = |x_c - x_t| \quad (18)$$

$$\Delta y = |y_c - y_t| \quad (19)$$

где  $\Delta x, \Delta y$  – абсолютные значения ошибки по горизонтали и вертикали,  $(x_c, y_c)$  – предсказанное значение центра объекта,  $(x_t, y_t)$  – значение центра объекта.

По мере накопления данных, координаты отслеживаемых участков изображения фильтруются на предмет выбросов. Значения, определённые алгоритмом фильтрации, составляет значение центра объекта (параграф 4.2).

Если среднее значение абсолютной ошибки превышает установленный порог, то модель будет переобучена на основе данных последних наблюдений: обучающая выборка будет создана заново, параметры модели изменятся.

### 3.1.3 Дообучение модели: дополнение компонент фильтр-функции

Этап сбора данных последующих наблюдений выполняется на каждой итерации алгоритма:

- Относительно новых координат центра, вырезается часть изображения с объектом и к ней применяются следующие яркостные преобразования: яркость тёмных пикселей изображения относительно светлых увеличивается логарифмированием, изображение нормализуется методом Z-оценки и значения на краях изображения сводятся к нулю окном Ханна (Хеннинга).
- Компоненты фильтра дополняются по формулам:

$$A = A + F(g) \times \bar{F}(u, v), \quad B = B + N \times F(u, v) \times \bar{F}(u, v) \quad (20)$$

где  $F(g)$  – матрица частот двумерной гауссианы,  $F(u, v)$  – матрица частот изображения объекта,  $\bar{F}(u, v)$  – комплексно сопряжённая матрица частот

изображения объекта (поворот изображения на 180 градусов),  $N$  – матрица 3% случайного импульсного шума.

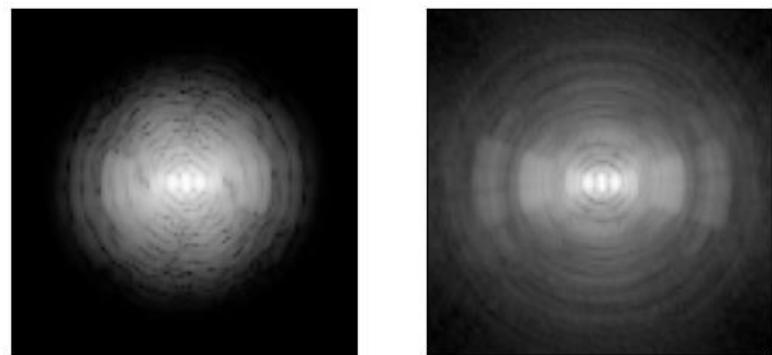


Рис. 3-25 Визуализация дополненных Фурье-спектров А (слева) и В (справа)

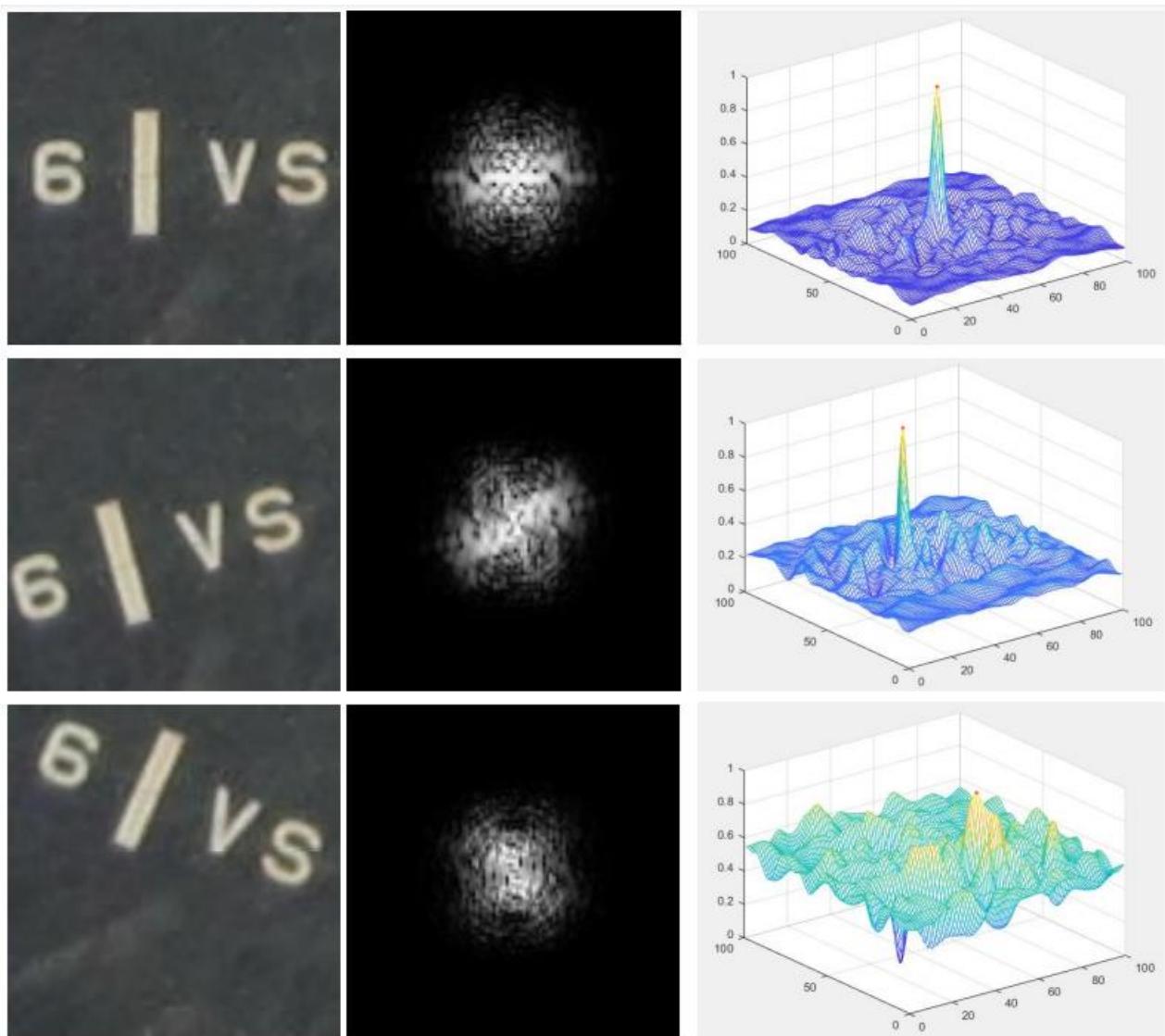


Рис. 3-26 Визуализация работы алгоритма отслеживания объектов после создания первичного фильтра (каждый ряд изображений содержит: смещённое изображение объекта (слева), произведение Фурье-спектров фильтра и изображения объекта (в

центре), матрицу яркости, полученную в результате обратного преобразования Фурье к изображению в центре, с максимумом, который соответствует центральной части искомого объекта (справа))

### 3.1.4 Математическое описание метода машинного обучения

Входные и выходные данные:

$K$  – пространство объектов.

$$K = \{k_1, \dots, k_m\} \quad (21)$$

где  $k_i$  – объект (изображение),  $1 \leq i \leq m$ .

$C$  – множество ответов.

$$C = \{c_1, \dots, c_m\} \quad (22)$$

где  $c_i$  – ответ,  $1 \leq i \leq m$ .

$n$  – длина выборки.

Множество признаков объектов:

$$\{F_1(u, v), \dots, F_m(u, v)\} \quad (23)$$

где  $F_i(u, v)$  – амплитудно-частотный спектр изображения,  $1 \leq i \leq m$ .

Обучающая выборка:

$$F_L^n = \{F_i(u, v) \mid i = 1, \dots, n\} \quad (24)$$

Алгоритм обучения:

$$A = \sum_{i=1}^n F(g) \times \bar{F}_i(u, v), \quad B = \sum_{i=1}^n N \times F_i(u, v) \times \bar{F}_i(u, v) \quad (25)$$

где  $\times$  – операция поэлементного умножения матриц,  $F(g)$  – матрица частот двумерной гауссианы,  $F_i(u, v)$  – матрица частот изображения объекта,  $\bar{F}_i(u, v)$  – комплексно сопряжённая матрица частот изображения объекта (поворот изображения на 180 градусов),  $N$  – матрица 3% случайного импульсного шума,  $n$  – целое число, обозначающее количество изображений выборки для создания первоначальной фильтр-функции (например, 125),  $u, v$  – частоты изображения по осям  $x$  и  $y$ .

Модель машинного обучения:

$$U_M = \{U(u, v, w_A, w_B) \mid w_A \in W_A, w_B \in W_B\}, \quad U(u, v, w_A, w_B) = \frac{A + w_A}{B + w_B} \quad (26)$$

где  $W_A$  – множество допустимых значений параметра  $w_A$ ,  $W_B$  – множество допустимых значений параметра  $w_B$ .

Процесс предсказания:

$$\hat{F}(u, v) = U \times F(u, v) \quad (27)$$

где  $\times$  – операция поэлементного умножения матриц,  $U$  – фильтр-функция,  $F(u, v)$  – матрица частот изображения, где предположительно находится сместившийся объект,  $\hat{F}(u, v)$  – Фурье-спектр прогноза.

Обратное преобразование Фурье прогноза:

$$f(x, y) = \mathcal{F}^{-1}(F(u, v)) \quad (28)$$

Нормализация изображения  $f(x, y)$ :

$$f_n(x, y) = \frac{f(x, y) - \min(f(x, y))}{\max(f(x, y)) - \min(f(x, y))} \quad (29)$$

где  $f(x, y)$  – матрица яркости пикселей изображения,  $f_n(x, y)$  – матрица яркости пикселей нормализованного изображения.

Определение координат  $x_c, y_c$  максимума яркости пикселей изображения  $f_n(x, y)$  точки  $c(x_c, y_c)$ .

Оценка качества:

$$\Delta x = |x_c - x_t|, \quad \Delta y = |y_c - y_t| \quad (30)$$

где  $\Delta x, \Delta y$  – абсолютные значения ошибки по горизонтали и вертикали,  $(x_c, y_c)$  – предсказанное значение центра объекта,  $(x_t, y_t)$  – значение центра объекта.

Дообучение модели машинного обучения:

$$A = A + F(g) \times \bar{F}(u, v), \quad B = B + N \times F(u, v) \times \bar{F}(u, v), \quad U = \frac{A}{B} \quad (31)$$

где  $F(g)$  – матрица частот двумерной гауссианы,  $F(u, v)$  – матрица частот изображения объекта,  $\bar{F}(u, v)$  – комплексно сопряжённая матрица частот

изображения объекта (поворот изображения на 180 градусов),  $N$  – матрица 3% случайного импульсного шума.

### 3.2 Условия на границах изображения

Следение за объектом происходит до момента выхода его за границы кадра на 70% от его длины или ширины, после объект отбрасывается.

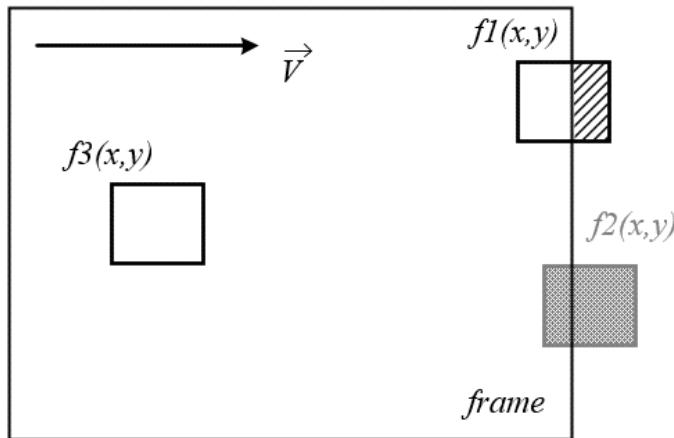


Рис. 3-27 Расположения объектов отслеживания в кадре  
 $f3(x,y)$  – объект отслеживания полностью в кадре,  
 $f2(x,y)$  – объект отслеживания более 70% от своей длины за границами кадра,  
 $f1(x,y)$  – объект отслеживания на 40% от своей длины за границами кадра,  
 $\vec{V}$  – направление движения объектов)

При выходе объекта за границы кадра и до достижения порога в 70% от его длины или ширины, границы изображения объекта дополняются копией его граничных пикселей.

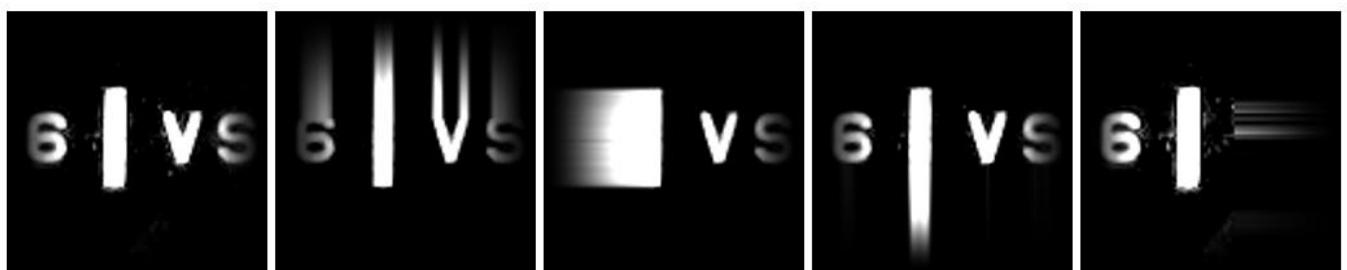


Рис. 3-28 Визуализация работы алгоритма отслеживания объектов при выходе объекта за границы кадра на 40% от его размера (длины или ширины)  
(слева направо: изображение объекта в границах кадра, копирование границ для верхней части изображения, левой, нижней и правой)

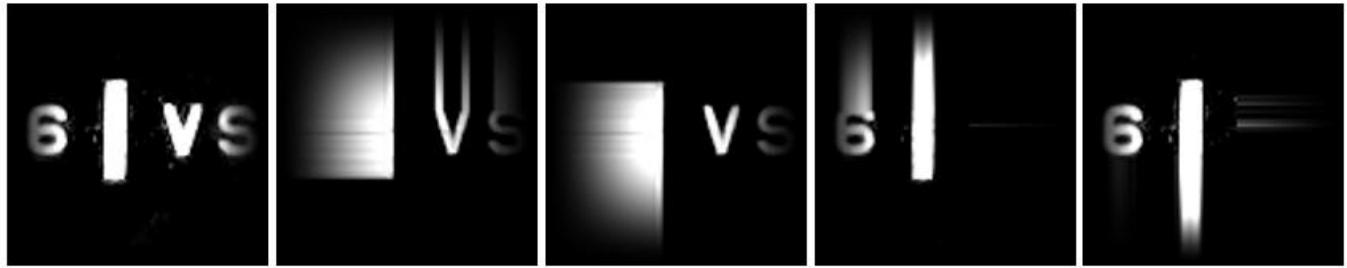


Рис. 3-29 Визуализация работы алгоритма отслеживания объектов при выходе объекта за границы кадра с двух сторон по 40% от его размера (длины или ширины) (слева направо: изображение объекта в границах кадра, копирование границ для верхней-левой части изображения, нижней-левой, верхней-правой и нижней-правой)

### 3.3 Обсуждение результатов

При сравнении программных реализаций алгоритмов отслеживания учитывались следующие критерии:

1. Точность определения величины смещения объекта при его отслеживании.

Незначительное отклонение (например, 2-3 пикселя) в определении величины смещения объекта на изображении приводит к погрешности вычисления значений продольного и вертикального смещения физического объекта от нескольких сантиметров до нескольких десятков метров, в зависимости от расстояния между объектом и камерой (точкой наблюдения). Погрешность порядка метра в определении величин смещения недопустима для высокоточного измерительного комплекса, предназначенного для автономной работы.

2. Время выполнения операции отслеживания объекта в программной реализации алгоритма.

Время выполнения операции отслеживания объекта влияет на точность работы алгоритма. Например, объект сместившийся на 2-5% от своего размера на двух соседних кадрах будет точнее определён, чем объект, сместившийся более чем на 50% от своего размера (по данным численных экспериментов). Чем больше независимых кадров в секунду получится обработать, тем точнее будет определено новое местоположение объекта.

Были проведены сравнения результатов работы программной реализации представленного метода (далее Adaptive Frequency Tracker (AFT)) с результатами работы программных реализаций следующих методов: On-line boosting [70], Multiple Instance Learning [71], Kernelized Correlation Filters [72], Median Flow [73], TLD (tracking, learning, detection) [74], CSRT (Discriminative Correlation Filter with Channel

and Spatial Reliability) [75], Median of Synthetic Exact Filters (MSEF) [76], MOSSE (Minimizing the Output Sum of Squared Error) [77].

При сравнении использовался набор из 9 видео по 2-7 минут подхода судна к причалу, отслеживалось по 4 объекта с каждого видео, примеры отслеживаемых объектов приведены на рисунке ниже. Для каждого алгоритма использовались одни и те же области изображения с объектами отслеживания.

Использовались алгоритмы отслеживания из библиотеки OpenCV 4.7.0, кроме алгоритмов MSEF и AFT, эти алгоритмы реализованы автором. Язык программирования – Python версии 3.10.10. Измерялось время выполнения операции отслеживания объекта. Для измерения времени использовалась функция Win32 QueryPerformanceCounter. Функция возвращает часы, прошедшие с момента первого вызова этой функции, в виде числа с плавающей запятой.

Основные результаты сравнения приведены в таблицах 3.3-1 и 3.3-2.

Таб. 3.3-1 Сравнительные данные времени выполнения операции отслеживания объектов

Алгоритм	Время выполнения операции отслеживания объектов в миллисекундах в среднем на 1000 кадров*			Количество обработанных кадров при частоте 72 кадра в секунду (в среднем, по указанным размерам объектов)
	<b>h = 108, w = 160</b>	<b>h = 45, w = 72</b>	<b>h = 40, w = 36</b>	
AFT	7.09	3.6	2.4	72
MSEF	11.8	9.3	8.7	72
BOOSTING	114.44	45.22	30.78	8.83
MIL	134.5	137.27	156.27	6.95
KCF	15.9	11.8	5.68	72
MOSSE	2.53	0.65	0.39	72
Median Flow	4.24	4.1	4.16	72
TLD	221.90	229.92	126.97	5.3
CSRT	81.6	72.6	60.2	11.89

\* h, w – соответственно высота и ширина области, содержащей объект отслеживания.

Таб. 3.3-2 Интервалы величин смещения центров объектов от их начальных положений

Алгоритм	Диапазоны смещения центра объекта от начального положения (в пикселях), выборочная проверка на 4 объектах*		
	Движение вперёд с разворотом объекта (кантовка судна буксирами**), при работе алгоритма менее 4 минут	С минимальным сдвигом объекта отслеживания (остановка судна буксирами***), при работе алгоритма менее 2 минут	Приближение объекта отслеживания (постановка судна к причалу****), при работе алгоритма менее 4 минут
AFT	1-5	1-2	3-6
MSEF	7-9	3-9	5-12
BOOSTING	5-19	7 - до полной потери объекта	20-43
MIL	5-12	3-4	4-12
KCF	2-9	7-19	6-12
MOSSE	3-7	10 - до полной потери объекта	14-30
Median Flow	40 - до полной потери объекта	21 - до полной потери объекта	21 - потеря объекта
TLD	8-40	20-60	10-123
CSRT	2-6	4-7	4-9

\* 4 объекта на каждом из трёх видео швартовки судна к причалу (Рис. 3-30).

\*\* разворот судна на 30 градусов

\*\*\* перед постановкой судна к причалу буксиры останавливают судно, скорость становится минимальной не более чем на 2 минуты.

\*\*\*\* после остановки судна буксиры начинают толкать судно к причалу.

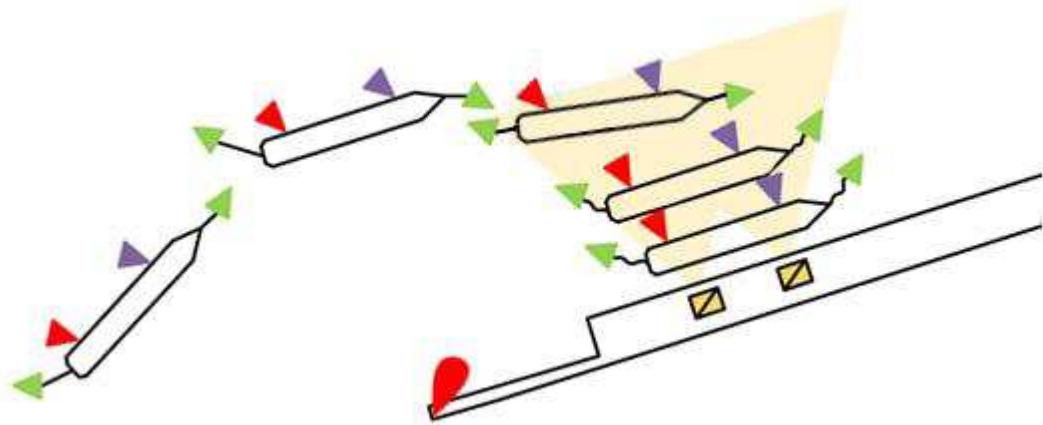


Рис. 3-30 Швартовка судна к причалу (пять положений судна (слева-направо): 1-2 – подход судна к причалу, 3 – кантовка судна буксирами, 4-5 – постановка судна к причалу)

Величина смещение центра объекта проверялась на 200 кадрах, включая первые и последние кадры, выборочно на промежуточных кадрах (3 видео, 4 объекта в каждом, проверено 2400 кадров).

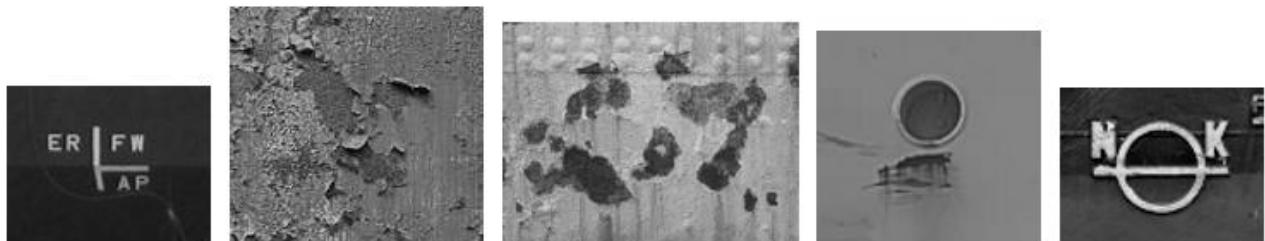


Рис. 3-31 Примеры объектов использованных при сравнении программных реализаций алгоритмов отслеживания

Примеры особенностей некоторых из рассмотренных алгоритмов отслеживания:

#### BOOSTING:

- На объектах по типу коррозионного рисунка меняется центр объекта от первоначально выбранного на 7-20 пикселей.
- Сравнительная производительность алгоритма низкая. Из 72 кадров в секунду обрабатывается в среднем 8.83 кадра.
- При скорости движения физического объекта больше 1 узла (1.85 км/ч) теряется объект отслеживания.

MIL:

- При минимальном смещении объекта (1-2 пикселя) алгоритм теряет объекты некоторых типов (коррозионный рисунок, сложные идентификационные знаки, состоящие из нескольких символов).

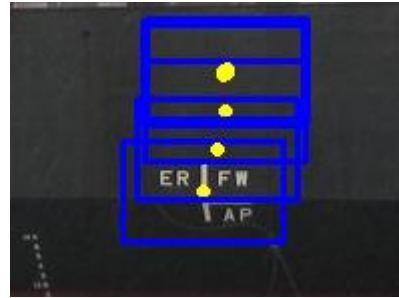


Рис. 3-32 Пример работы алгоритма MIL  
при минимальном смещении объекта отслеживания (1-2 пиксела)

- Сравнительная производительность алгоритма высокая. Из 72 кадров в секунду обрабатываются все кадры.

KCF:

- Сравнительная производительность алгоритма высокая, но при скорости физического объекта больше 3 узлов (5.56 км/ч) теряется объект отслеживания.
- При слежении за абсолютно неподвижными объектами, центр объекта меняется на 5-12 пикселей от своей первоначальной позиции.

MOSSE:

- Сравнительная производительность алгоритма высокая, но при скорости физического объекта больше 1 узла (1.85 км/ч) теряется объект отслеживания.
- При слежении за абсолютно неподвижными объектами, центр объекта меняется на 10-19 пикселей от своей первоначальной позиции.

Median Flow:

- Частая подмена объекта после создания фильтр-функции (зависит от яркости объекта). Тёмные объекты заменяются чаще всего.
- Меняется размер области, содержащей объект при его приближении или отдалении.

TLD:

- Сравнительная производительность алгоритма низкая. Из 72 кадров в секунду обрабатывается в среднем 5.3 кадра.
- При скорости физического объекта больше 1 узла (1.85 км/ч) теряется объект отслеживания.

CSRT:

- Сравнительная производительность алгоритма низкая. Из 72 кадров в секунду обрабатывается в среднем 11.89 кадра.
- При слежении за абсолютно неподвижными объектами, центр объекта меняется на 4-7 пикселей от своей первоначальной позиции.

MSEF и AFT реализованы автором. Основные результаты сравнения приведены в таблицах выше. Значительное преимущество за методом AFT по точности определения нового положения объекта и времени работы.

Высокая точность определения величины смещения объекта при его отслеживании, позволяет использовать разработанный и представленный в работе метод AFT в высокоточных измерителях. Значение также имеет адаптивность алгоритма к перекрытию объекта, к повороту, к изменению формы, от этого зависит будет ли потерян объект или это приведёт к его подмене.

Результаты отслеживания детерминированы, каждый шаг алгоритма заранее установлен. Т.к. в соответствии с требованиями стандартов метрологии результаты измерений должны быть однозначно определены, а методы, используемые в измерительном комплексе – верифицированы, т.е. каждый шаг алгоритма должен быть последователен и заранее известен. Поэтому алгоритмы, особенности работы которых неизвестны, или алгоритмы, представляющие недетерминированный результат для измерительного комплекса, не подходят.

Высокая производительность алгоритма позволяет использовать его в измерительном комплексе, работающем в реальном времени и в автономном режиме. Чем больше независимых кадров в секунду получится обработать, тем точнее будет определено новое местоположение объекта. Тем более актуальными будут данные для последующих вычислений.

## Глава 4. Разработка методики мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта

Материалы данной главы опубликованы в работах [79, 86].

Методика мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта является математическим обеспечением системы машинного обучения, а именно системы мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта. При этом система мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта является подсистемой системы высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы.

Исходными данными для системы мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта определения положения являются координаты отслеживаемых участков изображения. Выходными данными являются пространственно-временные параметры отслеживаемого объекта (объекта измерений – например, морского крупнотоннажного судна).

Методика определяет порядок преобразования входных данных в выходные в том числе методами машинного обучения. Всего методика включает пять методов, три из которых являются методами машинного обучения в режиме реального времени. Краткое представление и отличительные признаки методов машинного обучения, работающих в режиме реального времени, и пакетных методов машинного обучения приведены в главе 3.

Мониторинг движения крупногабаритного площадного объекта необходим для расчёта величин продольного и вертикального смещения, измерения скоростей движения и определения типа движения, прогнозирования будущих пространственно-скоростных параметров измеряемого объекта – морского крупнотоннажного судна. Всего методика состоит из пяти методов (Рис. 4-1): фильтрации координат, анализа траекторий, расчёта величин смещения, расчёта скоростей смещения и построения траектории движения.

На первом этапе входными данными являются координаты отслеживаемых объектов (участков изображения), которые фильтруются на предмет выбросов (Рис. 4-1, этап 1). По мере накопления информации об отслеживаемых участках изображения, анализируется траектория каждого из них (Рис. 4-1, этап 2): устанавливается тип движения каждого объекта. Объекты классифицируются в зависимости от характера движения. Делается предположение, относится ли отслеживаемый участок изображения к судну или его части. Выбираются объекты по анализу траекторий которых, сделан вывод, что характер движения этих объектов схож и объекты принадлежат судну или его частям, остальные объекты отбрасываются.

Далее сопоставляются разности величин смещения. По общей тенденции смещения отслеживаемых объектов рассчитывается величина смещения в пикселях части борта судна, видимого на изображении. По величине его сдвига в горизонтальном и вертикальном направлениях на последовательности кадров делается расчёт величины сдвига относительно измерителей в продольном и вертикальном направлениях в пространстве наблюдаемого участка судна (нос или корма) (Рис. 4-1, этап 3). Величины в пикселях соотносятся с величинами в метрах. Рассчитываются скорости движения отдельно для носа и кормы судна (Рис. 4-1, этап 4).

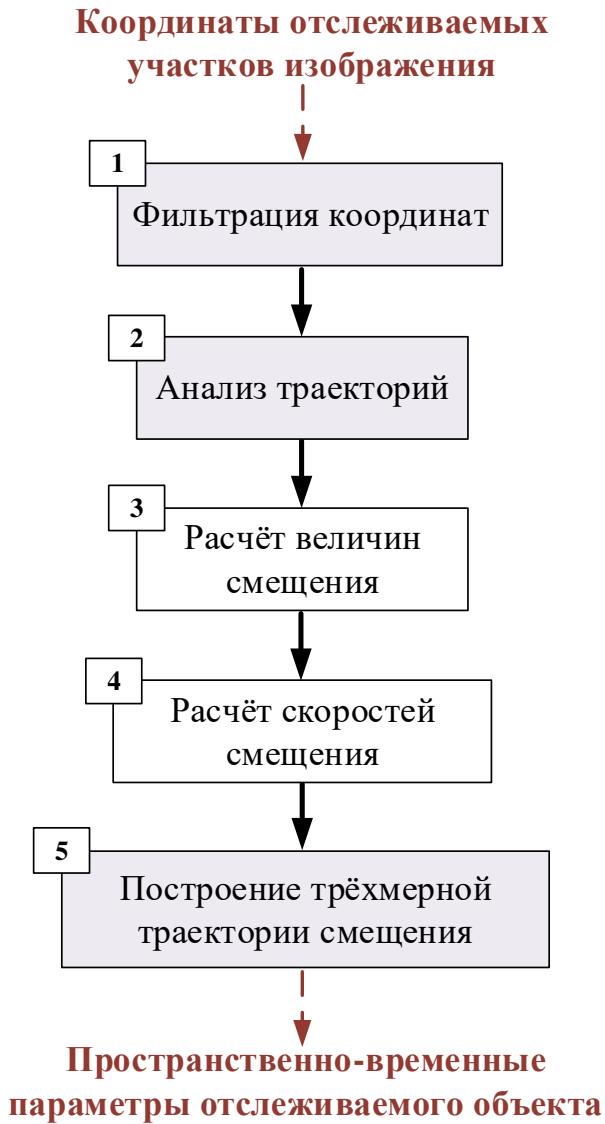


Рис. 4-1 Общее схематичное представление этапов разработанной методики мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта

Траектория движения (Рис. 4-1, этап 5) рассчитывается для прогнозирования движения судна во время подхода к причалу, швартовых операций и отхода судна

от причала, а также для поиска оптимального скоростного режима. Траектория строится отдельно для носа и кормы судна на основе данных двух оптических измерителей. Построение траектории начинается при подходе судна к причалу, продолжается во время швартовых операций и погрузочно-разгрузочных работ.

Построение трёхмерной траектории происходит на основе рассчитанной разницы в координатах объектов (отслеживаемых участков изображения) и информации о дистанции с лазерных дальномеров, входящих в состав оптических измерителей.

В разработанной методике мониторинга методами машинного обучения для каждого отслеживаемого объекта (участка изображения) решаются задачи 1 и 2.

1. Задача фильтрации выбросов (поиск в выборке данных нетипичных значений).

В задаче фильтрации выбросов обучающая выборка данных формируется по мере работы алгоритма фильтрации и на первой итерации алгоритма выборка данных состоит из двух значений – текущего и предыдущего значения фильтруемой координаты. Модель представляет собой функцию со множеством допустимых значений параметров. Часть параметров модели была рассчитана на этапе испытаний метода AFT, программная реализация которого прогнозирует координаты центров отслеживаемых объектов, значения которых фильтруются на предмет выбросов. Подробнее модель обучения описана в параграфе 4.2. Результаты работы алгоритма фильтрации – координаты отслеживаемых участков изображения. Их значения участвуют в оценке качества модели обучения алгоритма AFT и предназначены для расчёта величин смещения отслеживаемого объекта – морского крупнотоннажного судна.

2. Задача классификации ( поиск зависимости между объектами, используя данные о сходстве объектов).

Задача классификации сводится к поиску зависимости между объектами (отслеживаемыми участками изображения) с целью определения характера движения. В зависимости от характера движения объекта, делается предположение, относится ли отслеживаемый участок изображения к судну или его части. В задаче классификации используются данные о сходстве объектов. Данные о сходстве рассчитаны и описаны на этапах постановки задачи и сбора информации об объектах измерений – морских крупнотоннажных судах, и об

объектах, которые находятся в непосредственной близости и также находятся в движении (в том числе буксиры швартующие суда, плавучие знаки, подвижное портальное оборудование).

Для каждого отслеживаемого объекта создаётся признаковое описание, которое включает скорость движения, направление, ускорение движения, направление ускорения, время объекта в кадре. Для каждого признака задаётся вес – степень важности. Классификатор включает 4 класса (параграф 4.3). Параметры классов корректируются по мере работы алгоритма, реализующего задачу классификации. На значения параметров влияют в том числе дальность объекта измерений от места съёмки и его скорость движения. Например, на дальности в 400 метров до объекта измерений, бортовая или килевая качка судна менее заметны, чем на дальности в 15 метров. Для каждого отслеживаемого объекта после вычисления признаков рассчитывается степень принадлежности к определённому классу.

Для групп объектов методом машинного обучения решается задача 3.

### 3. Задача прогнозирования (предсказательное моделирование).

Для групп объектов реализуется задача прогнозирования – строится прогноз трёхмерной траектории движения объекта измерений (параграф 4.4). Объекты разбиваются на группы после этапа классификации. Прогноз представляет собой линейную зависимость последующих прогнозных точек траектории на основе уже известных. Размер выборки прогнозируемых значений зависит от периода времени, на который строится прогноз, дистанции до объекта и скорости его смещения.

В основе методов машинного обучения, представленных в этой главе, лежит обучение в режиме реального времени путём изменения параметров и накопления данных в условиях постоянно изменяющейся среды.

#### 4.1 Метод определения продольного и вертикального смещения

В литературе чаще всего упоминается два метода определения соответствия одного пикселя изображения физическим величинам (метры, миллиметры и т.д.): метод вычислений на основе формулы тонкой линзы и метод вычислений на основе формулы тангенса.

##### 4.1.1 Метод вычислений на основе формулы тонкой линзы

На основе информации о расстоянии до объекта (которое, например, определяется с помощью лазерного дальномера) и о размере матрицы камеры,

рассчитывается соответствие одного пикселя изображения нужной единице измерений (Рис. 4-2, Рис. 4-3).

Пример соотношения, из которого можно получить величину вертикального смещения:

$$\frac{H}{H'} = \frac{d}{v} \quad (32)$$

где  $H$  – величина вертикального смещения объекта на изображении (в пикселях),  $H'$  – количество пикселей матрицы, которое соответствует величине вертикального смещения,  $d$  – расстояние от объекта съёмки до линзы (мм),  $v$  – расстояния от матрицы до линзы (мм).

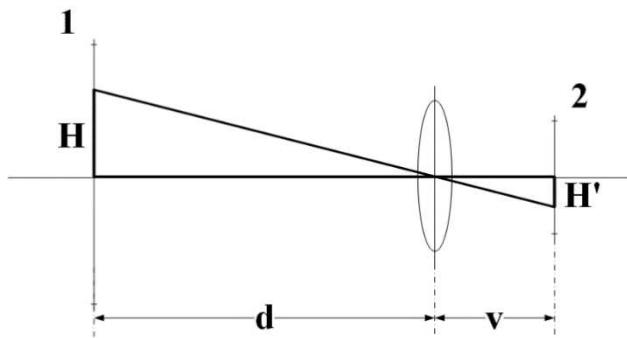


Рис. 4-2 Соответствие вертикального смещения  $H$  объекта на изображении некоторому количеству пикселей матрицы  $H'$   
(1 – изображение видимого поля, 2 – матрица камеры)

В соответствии с формулой тонкой линзы [78]:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad (33)$$

где  $f$  – фокусное расстояние линзы.

$$\frac{d}{v} = \frac{d}{f} - 1, \quad v = \frac{fd}{d-f} \quad (34)$$

Тогда

$$H = \left( \frac{d}{f} - 1 \right) \times H' \quad (35)$$

Так как размер изображения задаётся в пикселях, то вертикальное смещение будет получено в пикселях, чтобы перевести в нужную единицу измерений, нужно знать линейный размер пикселя, например, размер пикселя в мм. В зависимости от линейного размера матрицы будет меняться линейный размер пикселя.

Линейный размер пикселя будет определяться как:

$$L = 2f \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (36)$$

где  $f$  – фокусное расстояние,  $\alpha$  – угол обзора по горизонтали –  $H$  или по вертикали –  $V$ .

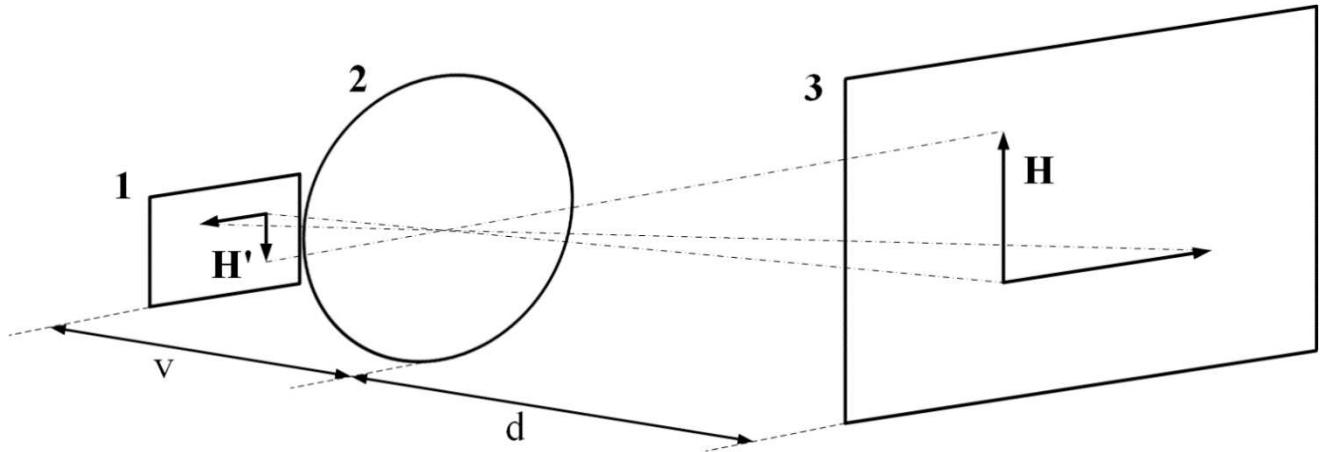


Рис. 4-3 Пример соответствия изображения видимого поля изображению, сформированному на матрице камеры  
(1 – матрица камеры, 2 – линза, 3 – изображение видимого поля)

#### 4.1.2 Метод вычислений на основе формулы тангенса

Расчёт величины продольного и вертикального смещения объекта на основе дистанции до объекта и угла обзора камеры (Рис. 4-4) по формуле тангенса – это вычисление отношения противолежащего катета к прилежащему в прямоугольном треугольнике.

$$n = d \times \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (37)$$

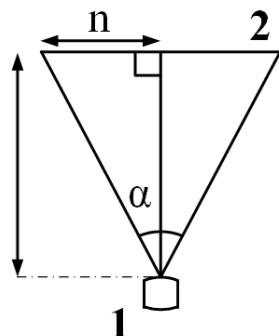


Рис. 4-4 Схема определения величины смещения объекта на основе дистанции до него и по величине угла обзора камеры (1 – камера, 2 – изображение видимого поля,  $\alpha$  – угол обзора,  $n$  – половина изображения видимого поля,  $d$  – дистанция до отслеживаемого объекта)

Для расчёта продольного смещения используется горизонтальный угол обзора, для расчёта вертикального смещения – вертикальный угол обзора.

Оба способа [79] были испытаны на объектах 50-170 см в ширину и до 120 см в высоту. Дистанция до объекта определялась фазовым дальномером, с погрешностью измерений  $\pm 20$  мм (стандартное отклонение одна сигма на расстоянии до 50 м) и с дополнительной погрешностью от расстояния  $\pm 10$  ppm.

Измерения проводились для диапазонов 0,5 – 4,5 м, 50 – 55 м, 140 – 145 м, 320 – 325 м и 495 – 500 м с шагом в 1 метр (Рис. 4-5, Рис. 4-6, Рис. 4-7, Рис. 4-8). Пунктирная линия показывает аппроксимацию экспериментальных данных. Точками на графике показаны измеренные значения, полученные в результате эксперимента.

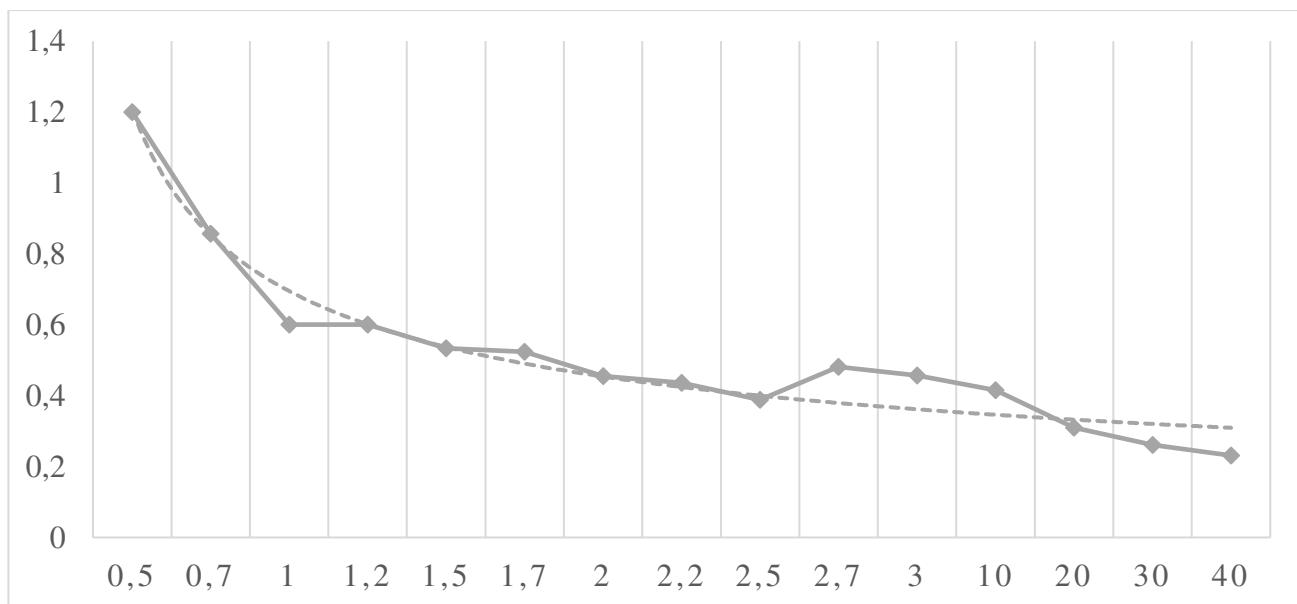


Рис. 4-5 Функция изменения относительной погрешности измерений по формуле тонкой линзы на дистанциях 0,5 – 40 м: ось ОХ – дистанция до объекта, м; ось ОY – относительная погрешность измерений, %

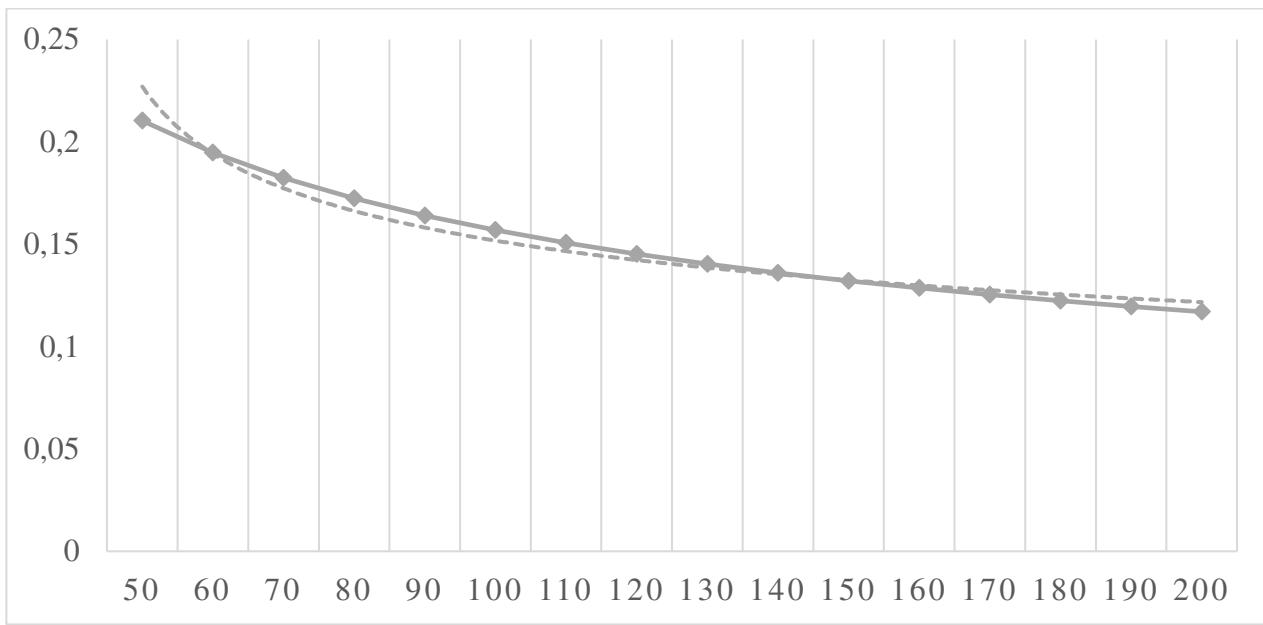


Рис. 4-6 Функция изменения относительной погрешности измерений по формуле тонкой линзы на дистанциях 50 – 200 м: ось ОХ – дистанция до объекта, м; ось ОY – относительная погрешность измерений, %

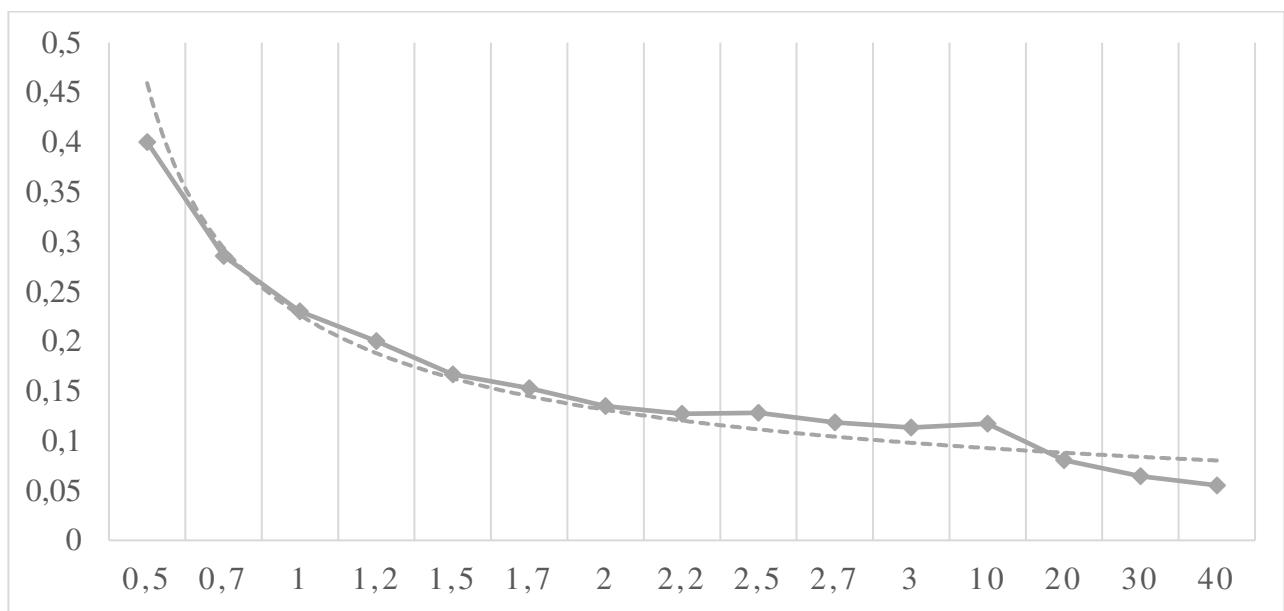


Рис. 4-7 Функция изменения относительной погрешности измерений по формуле тангенса на дистанциях 0,5 – 40 м: ось ОХ – дистанция до объекта, м; ось ОY – относительная погрешность измерений, %

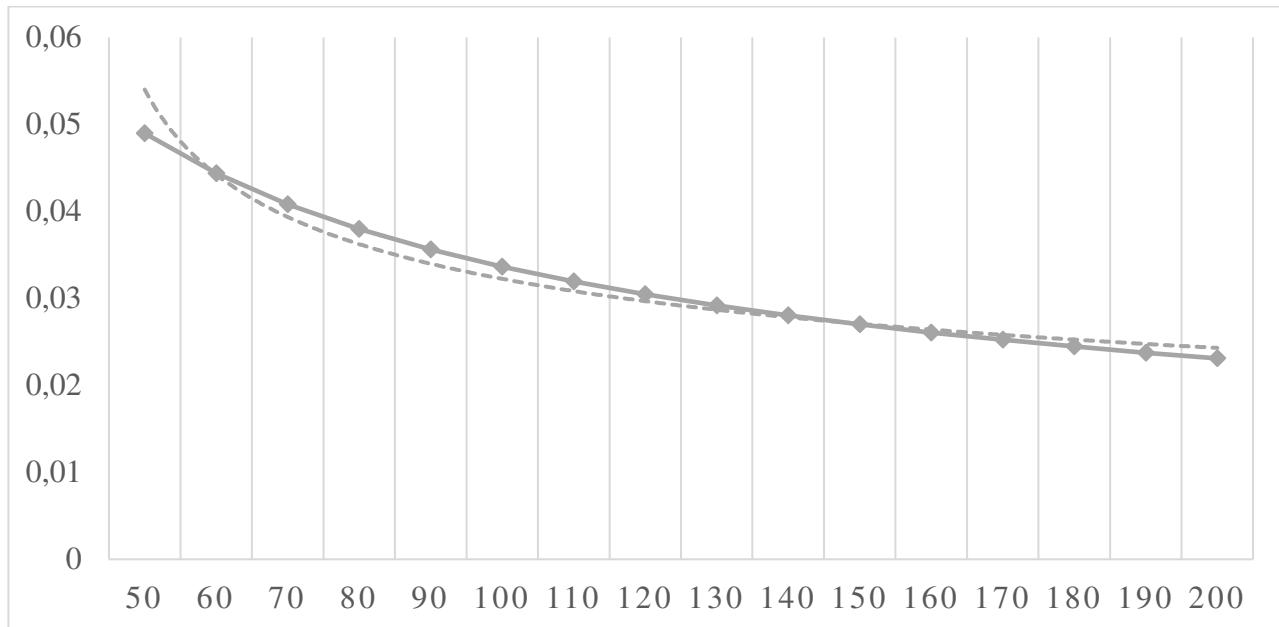


Рис. 4-8 Функция изменения относительной погрешности измерений по формуле тангенса на дистанциях 50 – 200 м: ось OХ – дистанция до объекта, м; ось OY – относительная погрешность измерений, %

С учётом погрешности измерения дальности и погрешности определения величины смещения объекта на изображении, наибольшую точность измерений продольного и вертикального смещения объекта показал метод, на основе формулы тангенса (Таб. 4.1-1).

Таб. 4.1-1 Значения относительной погрешности измерений

Характеристики камеры	диагональ матрицы – 43,1, f (фокусное расстояние) ~ 14 мм, $\alpha$ (угол обзора по диагонали) ~ 114°, соотношение сторон датчика – 16:9	$f \sim 14$ мм, $\alpha \sim 64^\circ$	$f \sim 35$ мм, $\alpha \sim 64^\circ$	$f \sim 70$ мм, $\alpha \sim 34^\circ$
Скорость съёмки	120 к/с			
Расстояние до объекта (d)	0,5 – 50 м	50 – 140 м	140 – 320 м	320 – 500 м

Относительная погрешность на 1000 измерений ( $\Delta = (Ax - A) / Ax$ ) при вычислении по формуле тонкой линзы.	$\pm 105$ мм	$\pm 190$ мм	$\pm 307$ мм	$\pm 397$ мм
Относительная погрешность на 1000 измерений ( $\Delta = (Ax - A) / Ax$ ) при вычислении по формуле тангенса.	$\pm 24$ мм	$\pm 39$ мм	$\pm 57$ мм	$\pm 70$ мм

Измерения и сбор данных проводились экспериментальным вариантом оптического измерителя с массивом камер с различным фокусным расстоянием (вариант измерителя с несколькими камерами был выбран для первого этапа исследований).

Объём экспериментальных данных, достаточен для выбора метода вычислений продольного и вертикального смещения, что подтверждается также результатами стендовых и натурных испытаний, в которых продольное и вертикальное смещение определялось методами компьютерного зрения в совокупности с формулой тангенса для определения величин смещения по горизонтали и вертикали. Контроль измерений осуществлялся поверенными лазерными дальномерами. Методики стендовых и натурных испытаний приведены в приложениях А и Б.

#### 4.2 Фильтрация данных

Координаты объектов фильтруются во время их отслеживания с применением дискретного фильтра Калмана [80, 81, 82]. Основная задача не сгладить значения, а найти наилучшее приближение координат к истинному значению. Под наилучшим приближением подразумевается достижение минимального значения средней квадратичной ошибки.

Алгоритм фильтрации состоит из двух циклических фаз: предсказание и корректировка. Целью алгоритма является вычисление апостериорной оценки состояния системы как линейной комбинации априорной оценки и взвешенной разницы между фактическим измерением и экстраполированным. Под системой понимается система контроля, состоящая из объекта наблюдения и измерителя.

### 1. Предсказание (априорные оценки).

$$x_0 = A \times f_{i-1} + B \times u_{i-1} \quad (38)$$

$x_0$  – предсказанное значение в текущий момент времени.

$A$  – матрица процесса в системе линейных уравнений (7) описывает как получается новое состояние системы из предыдущего. В случае одномерных переменных матрицы вырождаются в скалярные значения.  $A$  – это параметр, описывающий динамику системы. При  $A = 1$  предсказываемое значение будет равно предыдущему состоянию системы.

$f_{i-1}$  – значение состояния системы в прошлый момент времени.

$B$  – матрица управления. В случае, когда возможно только наблюдение, без возможности управления системой или её параметрами, значение  $B = 0$ .

$u_{i-1}$  – значение управляющего воздействия в прошлый момент времени также равно нулю из-за невозможности оказать управляющее воздействие на систему.

Так как фильтруются координаты отслеживаемых объектов на изображении, а новое положение объекта определяет метод АФТ (разработанный автором работы и представленный в главе 3), на который не оказывается влияние извне. Управляющего воздействия в данном случае не будет.

$$P_0 = A \times P \times A^T + Q \quad (39)$$

$P_0$  – предсказанное значение ошибки ковариации (мера неопределённости предсказанного значения).

$P$  – ковариационная матрица состояния. На первой итерации значение  $P = 0$ , т.к. значение ковариации неизвестно, далее значение рассчитывается.

$A^T$  – транспонированная матрица  $A$ .

$Q$  – матрица ковариации шума процесса. Данный параметр подбирается для обеспечения требуемого уровня фильтрации. Оценка величины неопределённости  $Q$  выполнялась в параграфе 4.1. На каждой итерации  $Q$

увеличивает неопределенность в оценке вектора состояния (предсказанного значения в текущий момент времени). Если установлено очень маленькое значение (например, 0.05), то неопределенность оценки будет медленно увеличиваться на этапе предсказания, а значит модель системы точно описывает процесс (Рис. 4-9). Если установить большое значение (например, 5), то неопределенность оценки будет быстро увеличиваться на этапе предсказания, а значит модель системы менее точно описывает процесс и возможно содержит больше неучтенных факторов (Рис. 4-10).

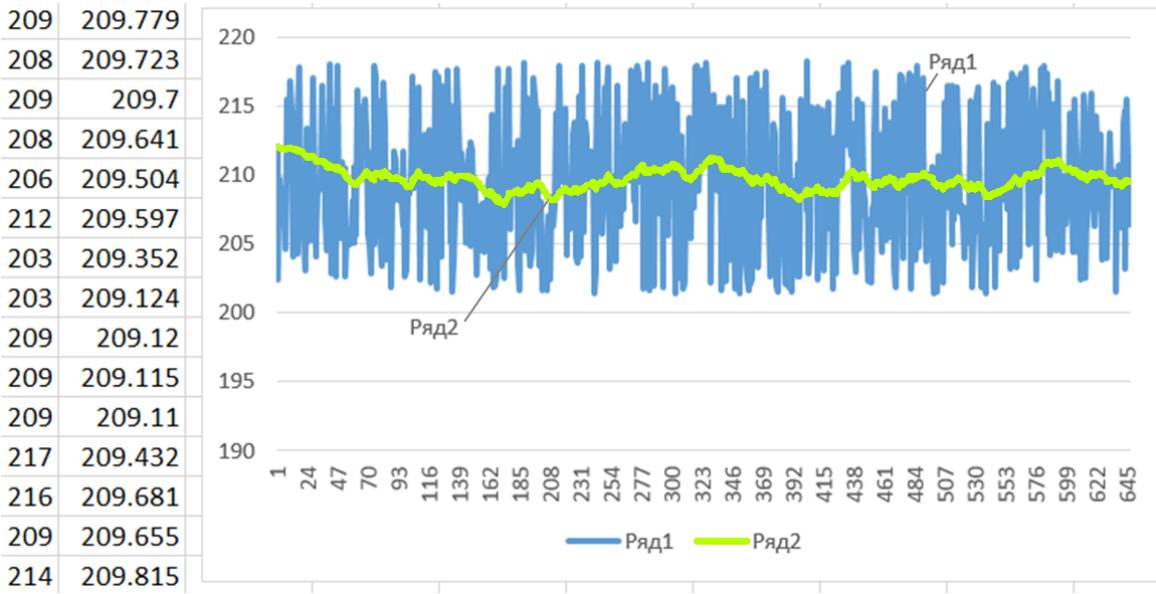


Рис. 4-9 Пример данных с моделью системы, которая точно описывает процесс,  $Q = 0.05$  (ряд1 – данные измерений, ряд2 – результат фильтрации)

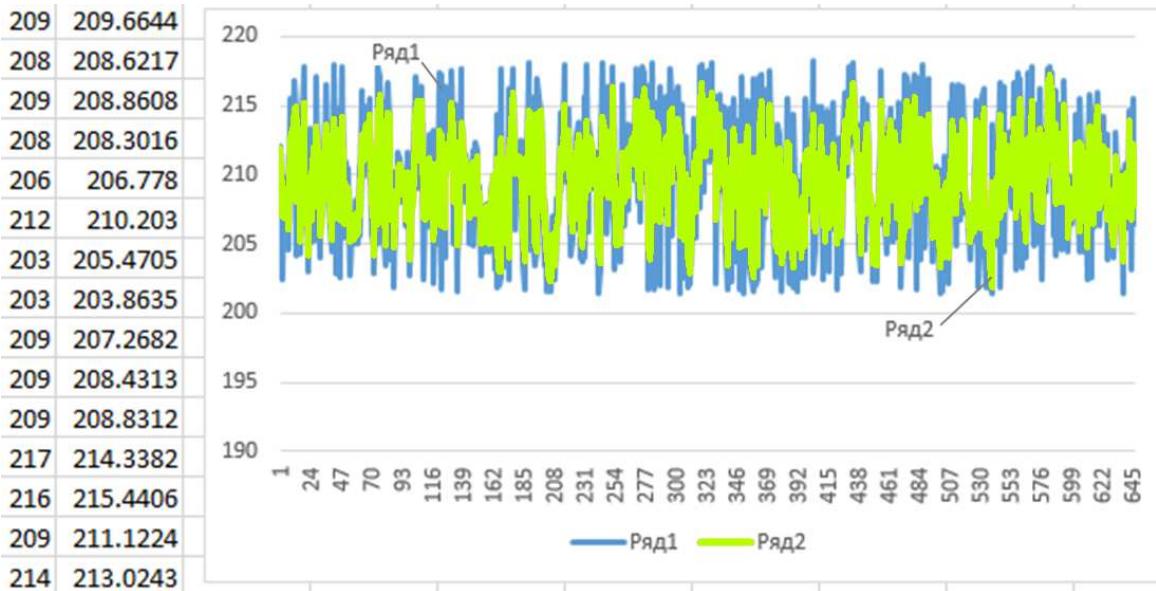


Рис. 4-10 Пример данных с моделью системы, которая менее точно описывает процесс,  $Q = 5$  (результаты фильтрации сильно приближены к данным измерений)

## 2. Корректировка оценок.

$$K = \frac{P_0 \times H^T}{H \times P_0 \times H^T + R} \quad (40)$$

$K$  – матрица усиления Калмана или коэффициент усиления, с помощью которого минимизируется апостериорная ошибка ковариации, за счёт подбора оптимального значения коэффициента усиления.

$H$  – матрица отношения описывает связь между предсказанным значением вектора состояния системы и измеренным значением вектора состояния.

$H^T$  – транспонированная матрица  $H$ .

$R$  – ковариация шума измерений (ошибка измерений).

$$x = x_0 + K \times (f_i - H \times x_0) \quad (41)$$

$X$  – обновлённое значение оценки с учётом результата измерений  $f_i$ .

$f_i$  – измерение в текущий момент времени.

$(f_i - H \times x_0)$  – отклонение фактического состояния системы от предсказанного. Отражает величину расхождения между экстраполируемым измерением и фактическим измерением.

$$P = (I - K \times H) \times P_0 \quad (42)$$

$P$  – ковариационная матрица состояния системы. Обновляется на каждой итерации.

$I$  – матрица идентичности (единичная матрица), используется для сокращённой записи разности между исходной величиной неопределённости вектора состояния и изменения неопределённости с момента предыдущего измерения.

### 4.2.1 Модель объекта наблюдения и описание свойств измерителя

В качестве модели движения объекта наблюдения была выбрана модель прямолинейного равноускоренного движения (43). Объекты на изображении, координаты которых фильтруются, представляют собой участки изображения, отслеживаемые на некотором промежутке времени.

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2} \quad (43)$$

где  $x$  – координата объекта в момент времени  $t$ ,  $x_0$  – начальная координата,  $v_0$  – проекция вектора скорости на ось  $X$  или  $Y$ ,  $t$  – время в движении,  $a$  – проекция ускорения на ось  $X$  или  $Y$ .

Матрица перехода между состояниями равна:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

где  $\Delta t$  – время прошедшее со смены кадра.

Вектор состояния:

$$f_i = \begin{bmatrix} c \\ v \\ a \end{bmatrix}$$

где  $c$  – фильтруемая координата  $x$  (для координаты  $y$  расчёты выполняются аналогично),  $v$  – скорость смещения по оси в пикселях в секунду,  $a$  – ускорение по оси в пикселях на секунду в квадрате.

На первой итерации значения компонент вектора состояния равны данным измерений. Значение ковариации неизвестно, поэтому

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

далее значение  $P$  рассчитывается.

$Q$  – матрица ковариации шума процесса выбрана по результатам оценки величины неопределённости в параграфе 4.1. Величина  $Q$  изменяется в зависимости от дистанции до объекта. Чем больше расстояние до объекта, тем меньше значение  $Q$ .

$$Q = \begin{bmatrix} q & 0 & 0 \\ 0 & q & 0 \\ 0 & 0 & q \end{bmatrix}$$

где  $q \in [0.5 ; 0.002]$ .

При малых значениях  $Q$  неопределённость оценки медленно увеличивается на этапе предсказания, а значит модель системы точно описывает процесс. На расстоянии 2 метра от причала величина  $Q$  будет равна 0.5, на 500 метров – 0.002.

Связь между предсказанным значением вектора состояния системы и измеренным значением вектором состояния:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Ошибка измерений  $R$  была рассчитана на этапе испытаний метода AFT (разница между истинным положением объекта и положением, определённым методом AFT). За ошибку измерений было принято среднеквадратичное отклонение, которое рассчитывалось для определения погрешности последовательных измерений.

На основе серии измерений (подробнее в главе 3) вычислялось среднеквадратичное отклонение.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (44)$$

$\bar{x}$  – среднее значение выборки.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i \quad (45)$$

$N$  – размер выборки.

$R = [1.3; 7.4]$  на дистанции [2; 500] метров соответственно (интервальные оценки).

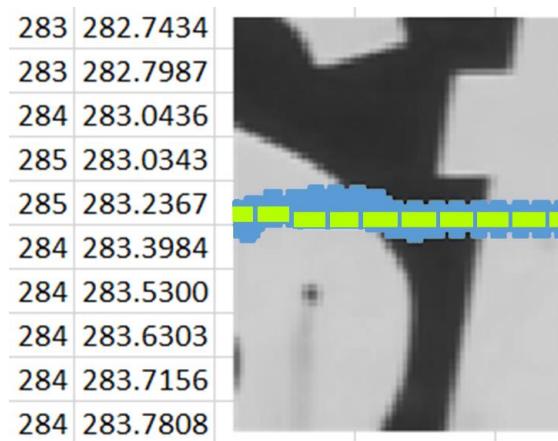


Рис. 4-11 Пример фильтрации измерений с выводом траектории движения объекта на соответствующий участок изображения (сплошная линия - результат фильтрации (значения округляются при выводе на изображение), пунктируя линия – данные измерений)

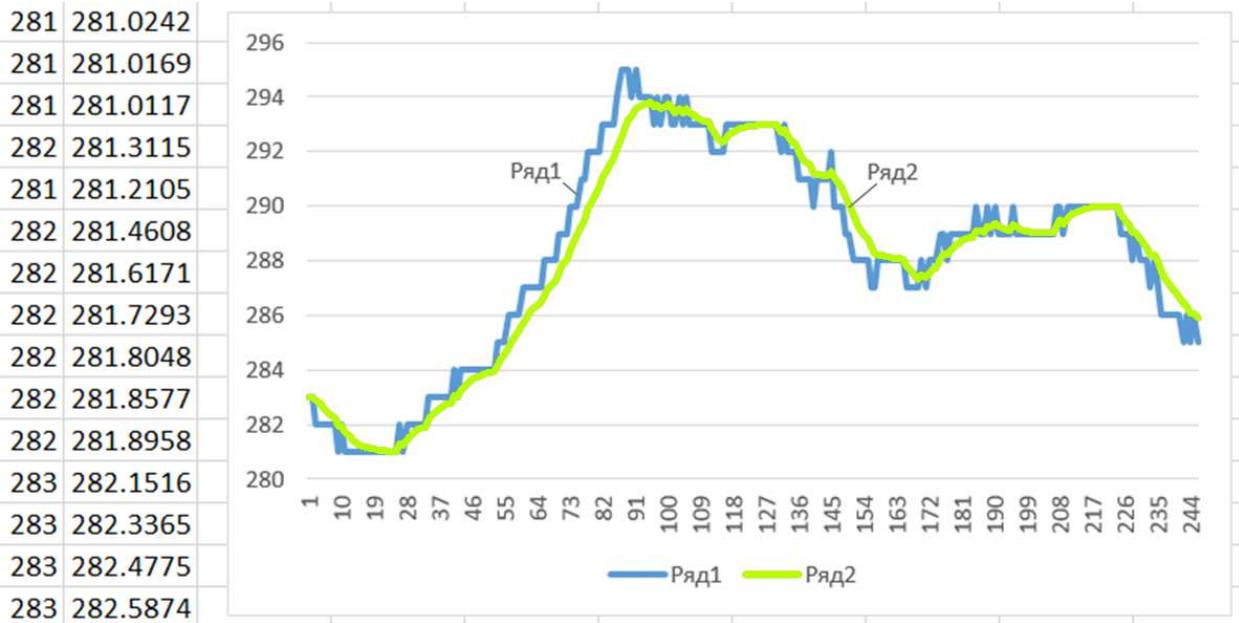


Рис. 4-12 Пример фильтрации измерений горизонтального смещения объекта (ряд1 – данные измерений, ряд2 – результат фильтрации)

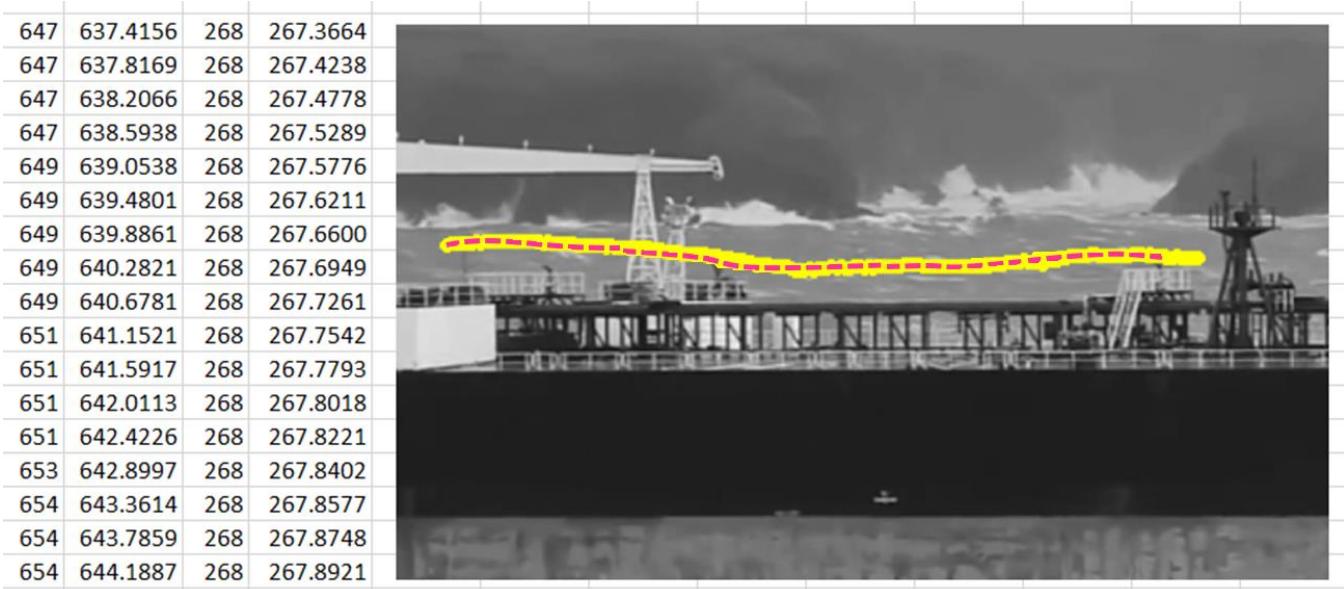


Рис. 4-13 Пример фильтрации измерений к координатам смещения объекта (сплошная линия – данные измерений, пунктирная линия – результат фильтрации (приближения))

На малых дистанциях до объекта (например, на дистанции в 5 метров) ошибка в расчётах смещения в несколько пикселей незначительна и даст погрешность в смещении в несколько миллиметров, но на большей дистанции (например, в 400 метров) погрешность может составить несколько метров. Этим фактом обусловлена необходимость фильтрации координат, поступающих на этапе отслеживания объектов. Также стоит учитывать, что сглаживание траектории движения объектов

в этой задаче недопустимо, т.к. при сглаживании теряется искомая величина смещения.

При выводе траектории на изображение координаты округляются до целых чисел, но при расчётах используются числа с плавающей запятой.

#### 4.2.2 Математическое описание метода машинного обучения

$R$  – пространство объектов.

$$R = \{r_1, \dots, r_m\} \quad (46)$$

где  $r_i$  – объект (участок объекта измерений),  $1 \leq i \leq m$ .

$X$  – множество ответов.

$$X = \{x_1, \dots, x_m\} \quad (47)$$

где  $x$  – ответ (предсказание),  $1 \leq i \leq m$ .

$n$  – длина выборки.

$F$  – пространство признаков объектов.

$$F = \{f_1, \dots, f_m\} \quad (48)$$

где  $f_i = \begin{bmatrix} c \\ v \\ a \end{bmatrix}$  – признак объекта (вектор состояния),  $1 \leq i \leq m$ ,  $c$  – фильтруемая координата,  $v$  – скорость смещения по оси в пикселях в секунду,  $a$  – ускорение по оси в пикселях на секунду в квадрате.

Обучающая выборка:

$$F_L^n = \left\{ f_i = \begin{bmatrix} c \\ v \\ a \end{bmatrix} \mid i = 1, \dots, n \right\} \quad (49)$$

Метод обучения:

$$x_0 = A \times f_{i-1} + B \times u_{i-1} \quad (50)$$

где  $x_0$  – предсказанное значение в текущий момент времени,  $A$  – матрица процесса в системе линейных уравнений,  $f_{i-1}$  – значение системы в прошлый момент времени,  $B$  – матрица управления,  $u_{i-1}$  – значение управляющего воздействия в прошлый момент времени.

$$P_0 = A \times P \times A^T + Q \quad (51)$$

где  $P_0$  – предсказанное значение ошибки ковариации (мера неопределённости предсказанного значения),  $P$  – ковариационная матрица состояния,  $A^T$  – транспонированная матрица  $A$ ,  $Q$  – матрица ковариации шума процесса.

$$K = \frac{P_0 \times H^T}{H \times P_0 \times H^T + R} \quad (52)$$

где  $K$  – коэффициент усиления (параметр модели), с помощью которого минимизируется апостериорная ошибка ковариации,  $H$  – матрица отношения описывает связь между предсказанным значением вектора состояния системы и измеренным значением вектора состояния,  $H^T$  – транспонированная матрица  $H$ ,  $R$  – ковариация шума измерений (ошибка измерений).

$$P = (I - K \times H) \times P_0 \quad (53)$$

где  $P$  – ковариационная матрица состояния системы,  $I$  – матрица идентичности (единичная матрица).

Модель машинного обучения:

$$U = \{u(x, K) | K \in W\}, \quad u(x, K) = x_0 + K \times (f_i - H \times x_0) \quad (54)$$

где  $W$  – множество допустимых значений матричного параметра  $K$ ,  $(f_i - H \times x_0)$  – отклонение фактического состояния системы от предсказанного.

Фильтр Калмана является частным случаем нелинейного фильтра Стратоновича [83, 84] и предназначен для вычисления приближения к истинному значению. На каждой итерации строится предположение о состоянии системы исходя из предыдущей оценки и данных измерений. Если неопределенность вектора состояния ( $P_0$ ) выше, чем ошибка измерения, то фильтром будут выбраны значения ближе к данным измерений. Если ошибка измерений больше оценки неопределенности состояния, то фильтром будут выбраны значения ближе к экстраполированным.

В сравнении с усреднением, фильтрация по Калману позволяет оценить состояние системы с учётом изменения во времени, тогда как при усреднении накапливается отставание оценки от реального значения.

В сравнении со скользящей средней функцией, фильтр Калмана позволяет подобрать усиление в зависимости от ошибки предсказания и учесть зависимость между параметрами.

В сравнении с альфа-бета фильтром, который является упрощённой формой фильтра Калмана [85], фильтр Калмана позволяет описать модель системы с

большой точностью за счёт большего количества учитываемых входных параметров, а значит получить требуемый уровень фильтрации.

Перед этапом фильтрации координат фильтром Калмана координаты проверяются на достоверность. Одним из свойств метода AFT является отсутствие случайных выбросов в координатах, поэтому при смещении объекта больше, чем на пороговую величину (например, в 12 пикселей по результатам испытаний алгоритма, описанных в главе 3) за одну итерацию алгоритма AFT, объект маркируется для дополнительной проверки. Если подобное смещение в координатах отслеживаемого объекта систематически повторяется (например, 5 раз), то объект признаётся ненадёжным и исключается из списка объектов отслеживания.

## 4.3 Анализ траекторий

### 4.3.1 Определение характера движения

Тип движения [86] устанавливается по мере накопления информации о смещении объектов (от 1080 значений для каждого объекта, что значит объект находится в кадре 15 секунд при частоте съёмки 72 к/с):

- движение вдоль одной из осей ( $X$  или  $Y$ );

Изменение координат происходит вдоль прямой линии с постоянным по модулю и направлению ускорением. Сложная траектория движения объекта учитывается постоянно. Под сложной траекторией понимается смена направления движения с одной оси на другую, что характерно для движения судна при подходе к причалу.

- комплексное движение;

Изменение координат происходит по закону, включающему сумму постоянного по модулю и направлению ускорения и циклически меняющейся компоненты ускорения (бортовая или килевая качка).

- движение в окрестности заданного центра;

Изменение координат характеризуется разной по модулю величиной смещения объекта. В зависимости от дальности объекта от места съёмки, окрестность может иметь различную величину, поэтому величина окрестности не задаётся.

- не установлен.

Изменение координат происходит по сложному закону, не принадлежащему первым трём типам движения.

Информация о типе движения объекта хранится только на время отслеживания объекта. После прекращения отслеживания информация за ненадобностью удаляется.

Отслеживается сразу несколько объектов (областей изображения), траектория каждого объекта анализируется независимо.

В зависимости от характера движения объекта, делается предположение, относится ли отслеживаемый участок изображения к судну или его части. Тогда уже по общей тенденции смещения отслеживаемых объектов рассчитывается величина смещения судна.

Примеры признаков: скорость движения, направление скорости, ускорение движения, направление ускорения, время объекта в кадре.

#### 4.3.2 Метаматематическое описание метода машинного обучения

$K$  – пространство объектов.

$$K = \{k_1, \dots, k_n\} \quad (55)$$

где  $k_i$  – объект (участок объекта измерений),  $1 \leq i \leq n$ .

$F$  – множество признаков объектов:

$$F = \{f_1, \dots, f_n\} \quad (56)$$

где  $f_i$  – признаки объектов,  $1 \leq j \leq n$ .

$Y$  – конечное множество классов:

$$Y = \{y_i \mid i = 1, \dots, m\} \quad (57)$$

$w$  – вектор весов:

$$w = \{w_1, \dots, w_n\} \quad (58)$$

где  $w_i$  – вес признака,  $1 \leq i \leq n$ .

Классификатор [87]:

$$\begin{aligned} a(k_u, w) &= \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m \left( \sum_{r=1}^s ((L(f_{1i}(k_r), f_{2i}(k_r), \dots, f_{ni}(k_r)) \right. \\ &\quad \left. = y_i) \times z(i, k_r, k_u, w)) \right) \end{aligned} \quad (59)$$

где  $z(i, k_r, k_u, w)$  – функция значимости объекта  $k_r$  по отношению к объекту  $k_u$  для  $i$ -го класса,  $L$  – таблично заданная функция принадлежности вектора

признаков классу из множества  $Y$ ,  $m$  – количество классов в множестве  $Y$ ,  $k_r$  – объект обучающей выборки,  $k_u$  – классифицируемый объект.

$$z(i, k_r, k_u, w) = \frac{g(i, k_r, k_u, w)}{d(k_r, k_u) + 1} \quad (60)$$

где  $g(i, k_r, k_u, w)$  – функция важности объекта  $k_r$ ,  $d(k_r, k_u)$  – дистанция между объектом обучающей выборки  $k_r$  и классифицируемым объектом  $k_u$ .

Значение функции  $g(i, k_r, k_u, w)$  определяется на основе обучающей выборки.

#### 4.3.3 Сопоставление разности величин смещения отслеживаемых объектов

На этапе сопоставления разности величин смещения остаются объекты (отслеживаемые участки изображения) по анализу траекторий которых, сделан вывод, что характер движения этих объектов схож и объекты принадлежат судну или его частям.

Далее анализируются разности величин смещения этих объектов и на основе этого анализа уже рассчитываются величины вертикального и горизонтального смещения судна.

Отдельно по  $X$  и  $Y$  каждой траектории вычисляется разность смещения (Таб. 4.3-1, Рис. 4-14, Рис. 4-15).

Таб. 4.3-1 Пример значений разности смещения между координатами объектов,  $X$ ,  $Y$  – координаты объектов,  $DifX$ ,  $DifY$  – разности координат при последовательных измерениях (все значения в таблице приведены в пикселях)

obj 0				obj 1				obj 2			
$X$	$DifX$	$Y$	$DifY$	$X$	$DifX$	$Y$	$DifY$	$X$	$DifX$	$Y$	$DifY$
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
231.46	0.1	260.9	-0.01	771.45	0.1	262.9	-0.01	270.46	0.1	280.9	-0.04
231.57	0.11	260.86	-0.02	771.56	0.1	262.86	-0.02	270.57	0.11	280.86	-0.04
231.72	0.15	260.82	-0.03	771.7	0.14	262.82	-0.03	270.72	0.15	280.82	-0.05
231.87	0.15	260.77	-0.04	771.85	0.14	262.77	-0.04	270.87	0.15	280.77	-0.05
232.02	0.15	260.72	-0.04	771.99	0.15	262.72	-0.04	271.02	0.15	280.72	-0.05
232.16	0.15	260.67	-0.05	772.14	0.15	262.67	-0.05	271.16	0.15	280.67	-0.05
232.31	0.15	260.61	-0.05	772.33	0.19	262.61	-0.05	271.35	0.19	280.61	-0.05
232.51	0.2	260.56	-0.05	772.52	0.19	262.56	-0.05	271.54	0.18	280.56	-0.05
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:

232.7	0.19	260.52	-0.05	772.7	0.18	262.52	-0.05	271.71	0.18	280.52	-0.05
232.88	0.18	260.47	-0.05	772.88	0.18	262.47	-0.05	271.89	0.18	280.47	-0.05
233.06	0.18	260.43	-0.04	773.07	0.18	262.43	-0.04	272.06	0.17	280.43	-0.04
233.24	0.18	260.38	-0.04	773.25	0.18	262.38	-0.04	272.28	0.22	280.38	-0.04
233.48	0.24	260.34	-0.04	773.5	0.25	262.34	-0.04	272.51	0.23	280.34	-0.04
233.72	0.24	260.3	-0.04	773.75	0.25	262.3	-0.04	272.73	0.22	280.3	-0.04
233.96	0.24	260.26	-0.04	774.01	0.26	262.26	-0.04	272.96	0.23	280.26	-0.04
234.2	0.24	260.22	-0.05	774.28	0.27	262.22	-0.05	273.24	0.28	280.22	-0.05
234.46	0.25	260	-0.22	774.63	0.35	262	-0.22	273.53	0.28	280	-0.22
234.76	0.31	260	0	774.97	0.33	262	0	273.81	0.28	280	0
235.06	0.29	260	0	775.29	0.32	262	0	274.08	0.27	280	0
235.35	0.29	260	0	775.61	0.32	262	0	274.35	0.28	280	0
235.64	0.29	260	0	775.93	0.33	262	0	274.69	0.34	280	0
235.97	0.33	260	0	776.27	0.34	262	0	275.03	0.34	280	0
236.31	0.34	260	0	776.67	0.4	262	0	275.36	0.33	280	0
236.64	0.33	260	0	777.05	0.38	262	0	275.68	0.32	280	0
236.96	0.32	260	0	777.42	0.37	262	0	276.01	0.33	280	0
237.28	0.32	260	0	777.79	0.37	262	0	276.35	0.34	280	0
237.67	0.39	259.98	-0.02	778.15	0.36	262	0	276.74	0.4	279.98	-0.02
238.03	0.36	259.95	-0.03	778.56	0.41	261.98	-0.02	277.12	0.38	279.95	-0.03
238.37	0.35	259.91	-0.04	778.95	0.39	261.95	-0.03	277.49	0.37	279.91	-0.04
238.71	0.34	259.87	-0.04	779.33	0.38	261.91	-0.04	277.86	0.37	279.87	-0.04
239.05	0.34	259.82	-0.04	779.71	0.38	261.87	-0.04	278.24	0.38	279.82	-0.04
239.46	0.41	259.83	0.01	780.15	0.45	261.88	0.01	278.68	0.44	279.83	0.01
239.84	0.38	259.85	0.01	780.57	0.41	261.88	0.01	279.1	0.41	279.85	0.01
240.21	0.37	259.86	0.01	780.96	0.39	261.89	0.01	279.5	0.4	279.86	0.01
240.57	0.36	259.87	0.01	781.34	0.38	261.9	0.01	279.9	0.4	279.87	0.01
240.93	0.36	259.88	0.01	781.73	0.38	261.91	0.01	280.29	0.38	279.88	0.01
241.36	0.43	259.81	-0.07	782.15	0.43	261.92	0.01	280.72	0.44	279.81	-0.07
241.77	0.41	259.74	-0.07	782.55	0.4	261.92	0.01	281.13	0.41	279.74	-0.07
242.16	0.39	259.68	-0.06	782.93	0.38	261.93	0.01	281.52	0.39	279.68	-0.06
242.54	0.38	259.63	-0.06	783.3	0.37	261.94	0.01	281.91	0.39	279.63	-0.06
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

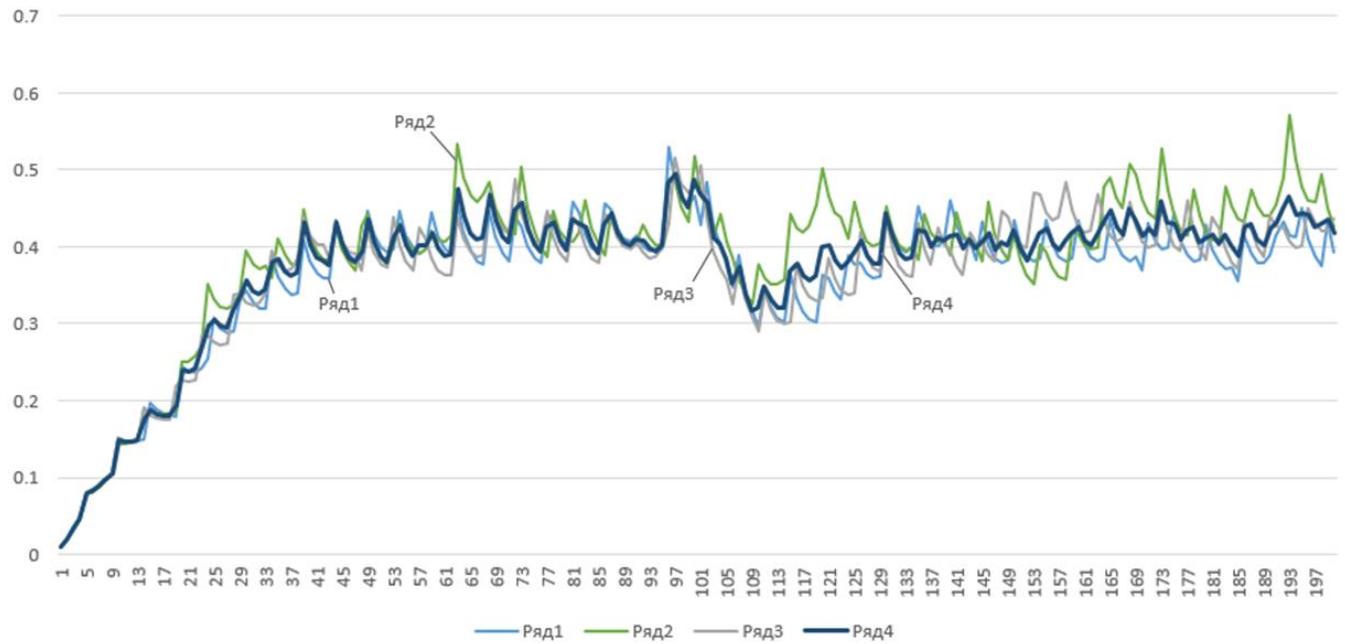


Рис. 4-14 Величины смещений координаты  $X$   
(ряд1-3 – величины смещения объектов,  
ряд4 – среднее значение по трём величинам)

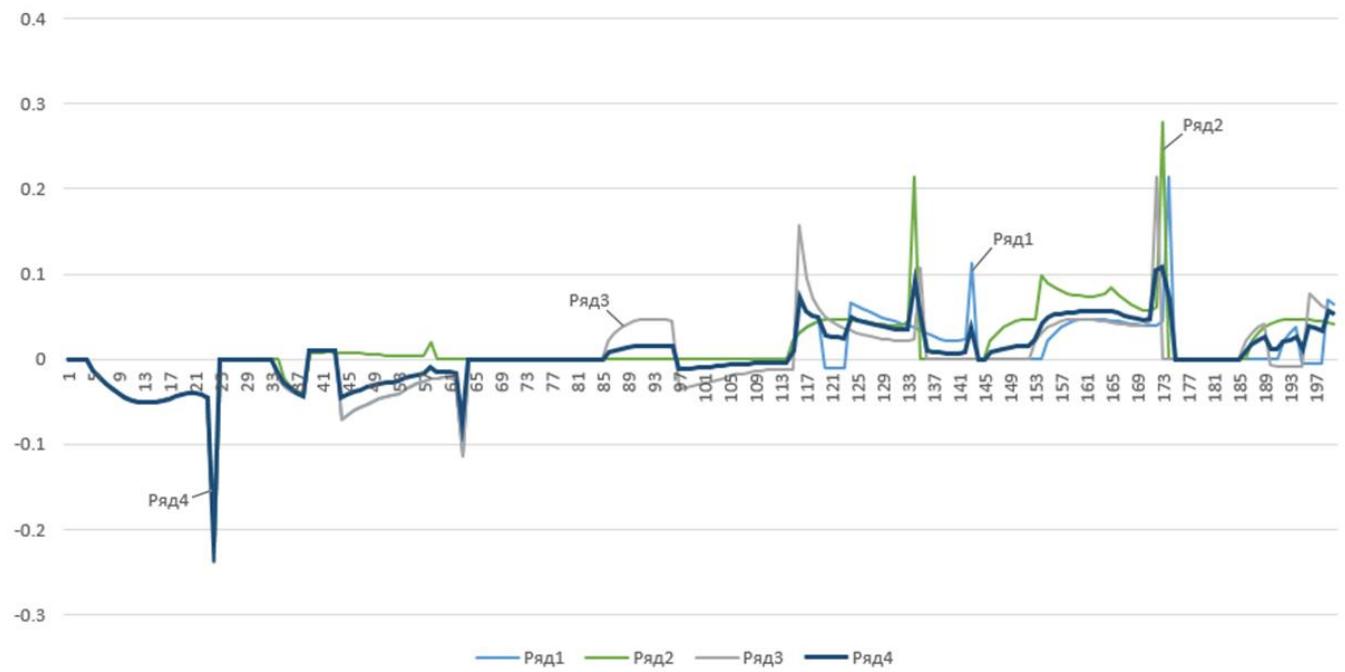


Рис. 4-15 Величины смещений координаты  $Y$   
(ряд1-3 – величины смещения объектов,  
ряд4 – среднее значение по трём величинам)

Для получения величины смещения используется среднее значение в смещении всех отслеживаемых объектов. Резкие скачки в величине сдвига отсекаются. Величина отсечённого скачка зависит от порядка обрабатываемых чисел и рассчитывается на основе среднеквадратичного отклонения выборки данных из последних 200 значений, увеличенного троекратно.

По величине сдвига в горизонтальном и вертикальном направлениях на изображении делается расчёт величины сдвига относительно измерителей в продольном и вертикальном направлениях наблюдаемого участка судна (нос или корма). Величины в пикселях соотносятся с величинами в пространстве, подробнее в параграфе 4.1.

#### 4.4 Построение трёхмерной траектории движения методом машинного обучения

Траектория движения рассчитывается для прогнозирования движения судна во время подхода к причалу, швартовых операций и отхода судна от причала, а также для поиска оптимального скоростного режима.

Траектория строится отдельно для носа и кормы судна на основе данных двух оптических измерителей. Построение траектории начинается на подходе судна к причалу, когда от борта судна до причала (места съёмки) – 200 метров, продолжается во время швартовых операций и погрузочно-разгрузочных работ. На время стоянки судна траектория не строится.

Построение трёхмерной траектории происходит на основе разницы в координатах объектов (отслеживаемых участков изображения) и информации о дистанции с лазерных дальномеров, входящих в состав оптических измерителей. Случайных выбросов в координатах объектов нет на этом этапе работы. Разница в траекториях объектов сглаживается по формуле среднего арифметического.

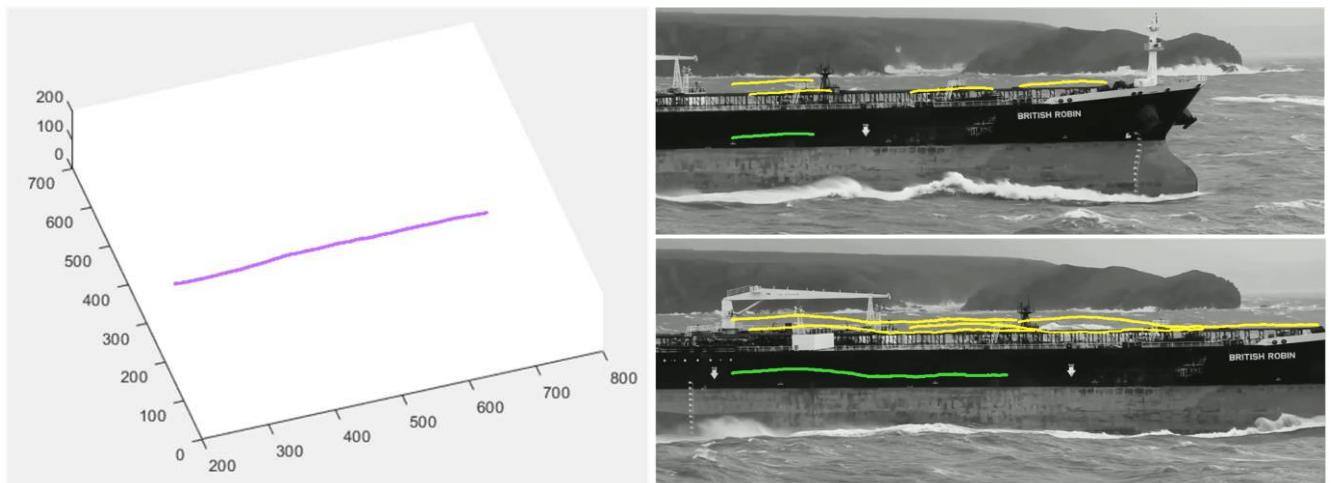


Рис. 4-16 Пример трёхмерной траектории движения (слева),  
построенной отдельно для носа судна (справа)

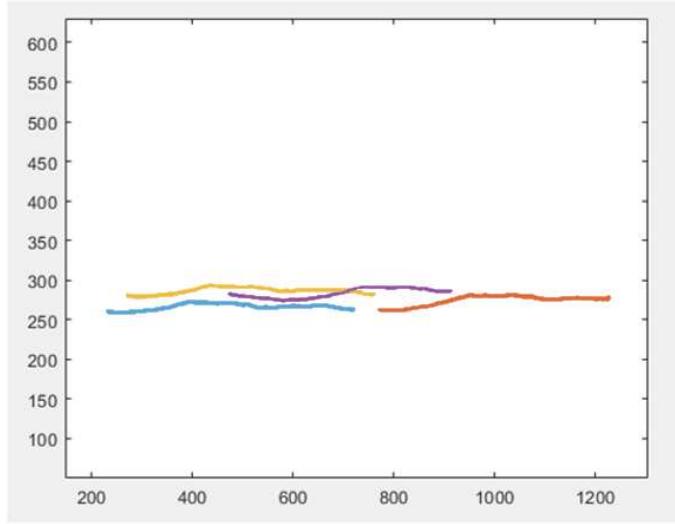


Рис. 4-17 Пример траекторий движения объектов (отслеживаемых участков изображения)

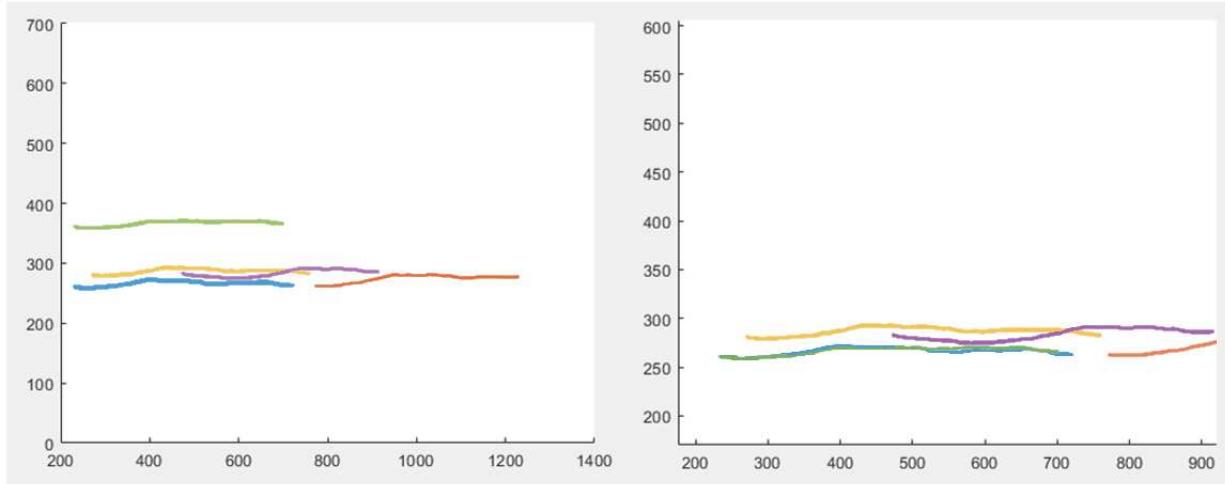


Рис. 4-18 Пример объединённой траектории движения носа судна и траекторий смещения отслеживаемых участков изображения:  
слева – объединённая траектория вынесена отдельно для наглядности (верхняя линия), справа – объединённая траектория построена из координат первого отслеживаемого объекта (левая нижняя линия)

Для прогнозирования положения объекта по высоте используется линейная регрессия по результатам 100 последних измерений (10 секунд работы измерителя при частоте данных 10 Гц), где 100 – среднее значение для получения значащей информации о смещении объекта, получено на основе экспериментальных данных. Значение меньше 100 даёт менее точный прогноз, что выражается в отличии прогнозируемых значений от измеренных более чем на 12 пикселей. Использование всех накопленных значений также не увеличивает точность прогноза, отличие составляет более 30 пикселей.

Порядок расчёта координат объекта. Расчёт координаты у:

$$y = ax + b \quad (61)$$

где  $a$  – угловой коэффициент,  $x$  – координата,  $b$  – высота, на которой прямая проходит через ось  $OY$ .

Коэффициенты  $a$  и  $b$  вычисляются по методу наименьших квадратов [88, 89].

$$\begin{cases} a = \frac{n \times \sum xy - \sum x \sum y}{n \times \sum x^2 - (\sum x)^2} \\ b = \frac{\sum y - b \times \sum x}{n} \end{cases} \quad (62)$$

Координата  $x$  прогнозируется по средней величине продольного смещения объекта.

$$x = D_x + x_i \quad (63)$$

где  $D_x$  – средняя величина продольного смещения за последние 100 измерений (10 секунд работы измерителя при частоте данных 10 Гц).

Аналогично рассчитывается прогноз для поперечного смещения объекта.

$$z = D_z + z_i \quad (64)$$

где  $D_z$  – средняя величина поперечного смещения за последние 100 измерений (10 секунд работы измерителя при частоте данных 10 Гц).

Размер выборки прогнозируемых значений зависит от периода времени, на который строится прогноз, дистанции до объекта и скорости его смещения (Рис. 4-19). При сравнении прогнозируемых и экспериментальных данных выявлено, что наиболее точный прогноз строится на дальность  $\sim 15$  метров (на дистанции 200 метров от борта судна до места установки оптического измерителя). Для прогнозирования на дистанцию свыше 15 метров следует учитывать управляющие воздействия, влияющие на движение судна. Для дистанции в 5 метров между бортом судна и местом установки измерителя прогноз строится на дальность не более 1 метра.

При выводе траектории на изображение координаты округляются до целых чисел, при расчётах используются числа с плавающей запятой. Частота данных для прогнозирования движения носа судна на рисунке ниже составляет 10 Гц. Прогноз строится по 100 последним координатам – это 10 секунд движения судна. Прогноз строится на 30 секунд вперёд.

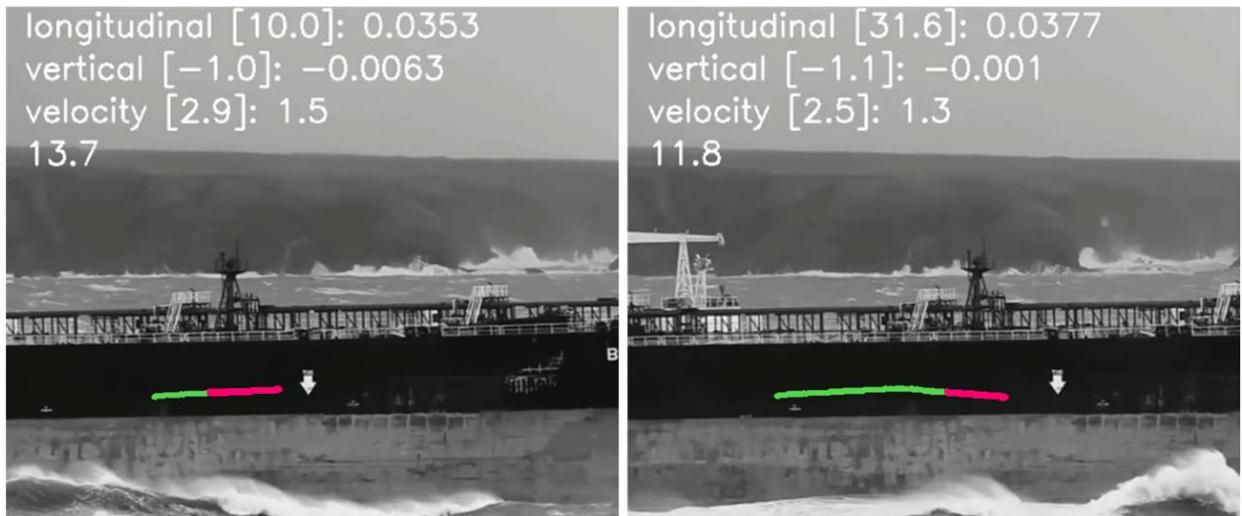


Рис. 4-19 Примеры прогнозируемых траекторий движения носа судна с прогнозом на 13.7 и 11.8 метров на дистанциях 174.5 и 175.3 метров от борта судна до места съёмки

Вывод траектории движения на изображение в течение рабочего цикла оптического измерителя не осуществляется. Все изображения, представленные в работе, были выполнены для визуализации работы алгоритмов.

Конечные потребители (системы автономного судовождения) информацию о смещении носа и кормы судна, скоростях движения, траекториях движения, прогнозируемые данные получают в виде полей информационного сообщения.

#### 4.5 Определение скорости смещения

Для определения скорости необходимо величину смещения объекта на изображении соотнести с величиной смещения в пространстве (параграф 4.1). Величина смещения определяется по результатам анализа траекторий движения подвижных областей изображения (параграф 4.3).

На этапе определения скорости смещения объекта под объектом понимается часть судна (нос или крма), величину смещения которой определяет оптический измеритель (одновременно работают два оптических измерителя для носа и кормы судна).

Для каждого оптического измерителя известны следующие величины смещения наблюдаемой части судна:

- поперечное смещение относительно точки измерений (определяется лазерным дальномером в составе оптического измерителя);
- продольное и вертикальное смещение относительно точки измерений (определяется алгоритмами компьютерного зрения, которые являются программной частью оптического измерителя).

Скорость определяется по формуле:

$$V = \frac{S}{T} \quad (65)$$

где  $V$  – скорость,  $S$  – расстояние,  $T$  – время.

Определяются три вида скоростей для носа и кормы судна:

- вертикальная скорость смещения;
- продольная скорость смещения;
- поперечная скорость смещения.

По результатам стендовых и натурных испытаний сделан вывод о возможности использования алгоритма без поправочных коэффициентов, компенсирующих возможные ошибки расчёта скоростей.

#### 4.6 Обсуждение результатов

Все изображения, представленные в работе, были выполнены для визуализации работы алгоритмов. В течение рабочих циклов оптических измерителей вывод данных на изображение не осуществляется. Также не ведётся запись с камер входящих в состав оптических измерителей. Камеры предназначены исключительно для расчёта величин продольного и вертикального смещения методами компьютерного зрения.

Записи рабочих циклов оптических измерителей (данные камер и дальномеров) сделаны в целях экспериментального подтверждения результатов работы алгоритмов.

Программно-аппаратный комплекс высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы предназначен для работы в составе систем автономного транспорта и решения задач контроля положения крупногабаритных объектов.

Конечные потребители (системы автономного транспорта) информацию о смещении наблюдаемого объекта, скоростях движения, траекториях движения, а также прогнозируемые данные получают в виде полей информационного сообщения.

Соответствие точности расчётных величин требуемым значениям было проверено в ходе стендовых и натурных испытаний комплекса высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы. Методики стендовых и натурных испытаний, а также требуемые точности измерений приводятся в приложениях А и Б.

Точность определения расчётных величин, проиллюстрированная в работе, обусловлена выбором параметров алгоритмов с учётом функционирования на определённом причале. В алгоритм работы измерителей включены условия, диктуемые планами швартовых операций и сборником обязательных постановлений по порту на причал, которого устанавливаются измерители. Это необходимо для алгоритмов отслеживания и идентификации судна в кадре, так как необходимо заранее знать:

1. какой разворот может выполнить судно и на каком расстоянии от причала;
2. под каким углом судно подходит к причалу;
3. скорость сближения судна с причалом;
4. сколько буксиров могут кантовать судно и возможность того, что буксир будет в кадре непосредственно перед судном в прямой видимости измерителей.

Учитываются факторы рабочей среды и характеристики причала, на котором устанавливаются измерители, что влияет на:

1. необходимость учёта присутствия в кадре объектов с похожими свойствами (например, другое судно) и других подвижных объектов (например, плавучих знаков или порталльных кранов);
2. дистанцию между установленными оптическими измерителями, которая зависит от размеров и типов судов, швартуемых к причалу. Дистанция между измерителями должна быть меньше предполагаемого размера судна.

Для использования комплекса на других причалах или использования его в целях отличных от задач морской транспортной отрасли, например, в задачах позиционирования железнодорожного вагона при загрузке сыпучим грузом или позиционировании грузового автомобиля относительно пакгауза, при реализации алгоритма должны быть учтены характеристики рабочей среды измерителей, а также особенности наблюдаемого транспортного средства.

## Заключение

В работе получены новые методы компьютерного зрения и машинного обучения, составляющие основу алгоритмического аппарата программно-аппаратного комплекса на базе оптических измерителей для высокоточного определения положения объектов относительно стационарной базы.

- 1) Определена структура измерительного комплекса на базе оптических измерителей. Измерительный комплекс позволяет выполнять высокоточные измерения положения объектов относительно стационарной базы методами машинного обучения и компьютерного зрения. Определён порядок использования измерительного комплекса, особенности юстировки элементов и режимы работы. Измеритель определяет величины продольного (горизонтального), поперечного и вертикального смещения наблюдаемого объекта, прогнозирует пространственно-скоростные параметры наблюдаемого объекта: скорости смещения, величины смещения. Разработаны методики стендовых и натурных испытаний измерительного комплекса на базе оптических измерителей.

В отличие от предыдущего уровня техники, позволяющего измерять с помощью лазерных дальномеров только величины поперечного смещения объекта, оптический измеритель позволяет в дополнение к поперечному смещению одновременно измерять продольное и вертикальное смещения объекта методами компьютерного зрения, что даёт возможность осуществлять мониторинг перемещения крупногабаритного объекта в трёхмерном пространстве.

- 2) Разработан метод определения движения в кадре и идентификации крупногабаритного площадного объекта. Метод включает этапы, на которых осуществляются: яркостные преобразования, оценка разницы между соседними кадрами, контурный анализ, анализ подвижных участков изображения, составление карты подвижных участков изображения.

В отличии от известных методов определения движения в кадре, предложенный метод позволяет определять области изображения с постоянным движением и исключать случайно попавшие в кадр подвижные объекты, что делает его применимым в условиях автономной работы оптических измерителей в режиме реального времени.

- 3) Разработан метод выбора объектов отслеживания. Метод включает этапы, на которых осуществляются: пространственная фильтрация данных изображения, деление регионов изображения на части, анализ частей региона.

Метод является новым и позволяет повысить качество отслеживания объектов частотными методами за счёт определения характеристик объектов (участков изображения), которые прослеживаются в амплитудно-частотном спектре.

- 4) Разработан метод отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту. Разработанный метод отслеживания объектов является адаптивным методом машинного обучения, в основе которого лежит обучение в режиме реального времени путём изменения параметров и накопления данных в условиях постоянно изменяющейся среды.

Модель машинного обучения  $U_M$ , используемая в методе:

$$U_M = \{U(u, v, w_A, w_B) \mid w_A \in W_A, w_B \in W_B\}, \quad U(u, v, w_A, w_B) = \frac{A + w_A}{B + w_B},$$

где  $W_A$  – множество допустимых значений параметра  $w_A$ ,  $W_B$  – множество допустимых значений параметра  $w_B$ .

$$A = \sum_{i=1}^n F(g) \times \bar{F}_i(u, v), \quad B = \sum_{i=1}^n N \times F_i(u, v) \times \bar{F}_i(u, v),$$

где  $\times$  – операция поэлементного умножения матриц,  $F(g)$  – матрица частот двумерной гауссианы,  $F_i(u, v)$  – матрица частот изображения объекта,  $\bar{F}_i(u, v)$  – комплексно сопряжённая матрица частот изображения объекта,  $N$  – матрица случайного импульсного шума,  $n$  – целое число, обозначающее количество изображений выборки для создания первоначальной фильтр-функции,  $u, v$  – частоты изображения по осям  $x$  и  $y$ .

По результатам сравнительного анализа алгоритмов отслеживания объектов предлагаемый метод машинного обучения в отличие от аналогов устойчив к частичному перекрытию объекта (сохраняется качество отслеживания), выходу объекта за границы изображения, повороту и изменению масштаба объекта, применительно к задаче отслеживания крупногабаритного площадного объекта по его наблюдаемому фрагменту.

- 5) Разработана методика мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта, включающая: фильтрацию координат отслеживаемых объектов, анализ траекторий, расчёт величин смещения, расчёт скоростей смещения, построение трёхмерной траектории движения объекта измерений. В методике приводится описание порядка использования методов машинного обучения, что позволяет для каждого отслеживаемого

объекта решать задачи: фильтрации выбросов; классификации; прогнозирования.

Модель машинного обучения, используемая в методе фильтрации выбросов:

$$U = \{u(x, K) | K \in W\}, \quad u(x, K) = x_0 + K \times (f_i - H \times x_0)$$

где  $W$  – множество допустимых значений матричного параметра  $K$ ,  $(f_i - H \times x_0)$  – отклонение фактического состояния системы от предсказанного,  $K$  – коэффициент усиления, с помощью которого минимизируется апостериорная ошибка ковариации,  $f_i = \begin{bmatrix} c \\ v \\ a \end{bmatrix}$  – признак объекта (вектор состояния),  $1 \leq i \leq m$ ,  $c$  – фильтруемая координата,  $v$  – скорость смещения по оси в пикселях в секунду,  $a$  – ускорение по оси в пикселях на секунду в квадрате,  $H$  – матрица отношения, которая описывает связь между предсказанным значением вектора состояния системы и измеренным значением вектора состояния,  $x_0$  – прошлое предсказание относительно значения текущего момента,  $x$  – предсказанное значение.

Классификатор, используемый в методе классификации объектов при анализе траекторий:

$$\begin{aligned} a(k_u, w) &= \arg \max_{y \in Y} \sum_{i=1}^m \left( \sum_{r=1}^s ((L(f_{1i}(k_r), f_{2i}(k_r), \dots, f_{ni}(k_r)) \right. \\ &\quad \left. = y_i) \times z(i, k_r, k_u, w)) \right) \end{aligned}$$

где  $z(i, k_r, k_u, w)$  – функция значимости объекта  $k_r$  по отношению к объекту  $k_u$  для  $i$ -го класса,  $L$  – таблично заданная функция принадлежности вектора признаков классу из множества  $Y$  (конечное множество классов),  $m$  – количество классов в множестве  $Y$ ,  $k_r$  – объект обучающей выборки,  $k_u$  – классифицируемый объект.

Методика является новой и позволяет осуществлять мониторинг крупногабаритных площадных объектов с учётом характера их движения. Выбран и обоснован метод фильтрации данных для задачи мониторинга движения крупногабаритного площадного объекта, определена физическая модель измеряемого крупногабаритного площадного объекта, выбран метод расчёта ошибки измерений, методика описывает порядок

классификации движения объектов в кадре методом машинного обучения в соответствии с заданными классами движения.

Предложенные алгоритмы и методы применимы:

1. В промышленности:

- при сцепке деталей, когда точность совмещения деталей влияет на прочность, герметичность и надёжность функционирования промышленного изделия;
- в ремонтно-профилактических работах, когда вес объекта не позволяет его свободно перемещать, а постановка на докование требует контроля и точности.

2. В транспортной отрасли:

2.1. Морской и речной транспорт:

- при позиционировании морского судна относительно причала при выполнения погрузо-разгрузочных работ и швартовых операций;
- в процессе мониторинга и анализа окружающей обстановки с борта судна.

2.2. Железнодорожный транспорт:

- при позиционировании вагонов на путях необщего пользования (например, на территории порта) в процессах налива цистерн, загрузки сыпучим грузом, выгрузки груза;
- во время замены тележек под вагонами для обеспечения бесперегрузочного железнодорожного сообщения в случаях, когда перегрузку проводить опасно или экономически невыгодно;
- при токарной обработке поверхностей катания колесных пар вагонов или паровозов без выкатки тележек на специальных токарных станках;
- при позиционировании железнодорожного вагона в процессе взвешивания на весах с расцепкой и без расцепки железнодорожного состава;
- при позиционировании железнодорожных цистерн на сливо-наливной эстакаде.

2.3. Воздушный транспорт:

- при позиционировании корпуса воздушного судна в процессе постановки в ангар для выполнения ремонтно-профилактических работ;

- при позиционировании корпуса воздушного судна в процессестыковки с телескопическим трапом;
- при позиционировании корпусов воздушных судов на местахстоянки в ангарах.

2.4. Автодорожный транспорт:

- при позиционировании грузового автомобиля относительно пакгауза в процессе загрузки и выгрузки;
- при позиционировании автоцистерны на сливо-наливной эстакаде;
- при позиционировании автодорожного транспортного средства в процессе взвешивания на весах.

3. В автономных системах:

- для оперативного получения и анализа информации о текущей обстановке, например, в автономных транспортных системах: положение транспортного средства в пространстве, наличие других транспортных средств или крупногабаритных объектов поблизости.

4. Отдельные методы, представленные в работе, могут иметь широкое применение в различных отраслях для задач мониторинга положения объектов сложной формы методами компьютерного зрения.

Применение разработанных алгоритмов и методов в вышеперечисленных сферах является предметом отдельных возможных исследовательских работ.

## Список литературы

1. Беляков В. В., Зезюлин Д. В., Макаров В. С. Автоматические системы транспортных средств. Изд.: Форум - 2023. - 352 с.
2. Капский Д. В., Ларин О. Н., Кот Е. Н., Богданович С. В., Семченков С. С. Основы автоматизации интеллектуальных транспортных систем. - Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. - 412 с.
3. Батуев А.С. Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем. 3-ие издание. СПб.: Питер, 2012. – 317 с.
4. Смирнов В. М., Будылина С. М. Физиология сенсорных систем и высшая нервная деятельность: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Издат. центр «Академия», 2003. – 304 с. – ISBN 5-7695-0786-1. – С. 178–196.
5. Марр Д. Зрение. Информационный подход к изучению представления и обработки зрительных образов. Пер с англ. М.: Радио и связь, 1987.
6. Клетте Р. Компьютерное зрение. Теория и алгоритмы. Изд.: ДМК Пресс. - 2019. - 506 с.
7. Forsyth D., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. - Pearson Education, 2015. - p. 792.
8. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. ISSN 1868-0941. - 2010. - p. 832.
9. Сафиуллин Р. Н., Резниченко В. В., Калюжный А. Ф. Системы автоматизации контроля движения на автомобильном транспорте. Монография. Санкт-Петербург: Лань, 2024. - 516 с.
10. Lippmann G. Epreuves reversibles donnant la sensation du relief //J. Phys. Theor. Appl. – 1908. – Т. 7. – №. 1. – С. 821-825.
11. Гершун, А.А. Световое поле / А. Гершун. - Л.; М. : ОНТИ. Гл. ред. общетехн. лит., 1936. - 178 с.
12. E. H. Adelson and J. Y. A. Wang, "Single lens stereo with a plenoptic camera," in IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pp. 99-106
13. Wright W. D. Stereoscopic vision applied to photogrammetry //The Photogrammetric Record. – 1954. – Т. 1. – №. 3. – С. 29-49.
14. Lerman J. B. Computer processing of stereo images for the automatic extraction of range: дис. – Massachusetts Institute of Technology, 1970.
15. Barnard S. T., Thompson W. B. Disparity analysis of images //IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1980. – №. 4. – С. 333-340.
16. H. Baker and T. Binford. Depth from edge and intensity based stereo. In IJCAI81, pages 631–636, 1981.
17. Rosen C. A. Machine vision and robotics: Industrial requirements //Computer vision and sensor-based robots. – Boston, MA: Springer US, 1979. – С. 3-22.

- 18.Girod B., Scherock S. Depth from defocus of structured light. Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision IV. – SPIE, 1990. – Т. 1194. – С. 209-215.
- 19.Frankowski, G., Chen, M., Huth, T. (2000). Real-time 3D shape measurement with digital stripe projection by Texas Instruments Micro Mirror Devices DMD. Three-Dimensional Image Capture and Applications, 3958, 1.
- 20.Nickles R. J., Meyer H. O. Three-dimensional time-of-flight gamma camera system. 1976.
- 21.Mullani N. A., Markham J., Ter-Pogossian M. M. Feasibility of time-of-flight reconstruction in positron emission tomography. Journal of Nuclear Medicine. – 1980. – Т. 21. – №. 11. – С. 1095-1097.
- 22.Солощев О. Н., Слюсар В. И., Твердохлебов В. В. Фазовый метод измерения дальности на основе теории многоканального анализа. Артиллерийское и стрелковое вооружение. - 2007. - № 2(23). - С. 29-32.
- 23.Collis R. T. H. Lidar. Advances in Geophysics. – Elsevier, 1969. – Т. 13. – С. 113-139.
- 24.Hauchecorne A., Chanin M. L. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km. Geophysical Research Letters. – 1980. – Т. 7. – №. 8. – С. 565-568.
- 25.Poole H. E., Cox J. W., Couch R. H., Fuller Jr. W. H. A lidar technology experiment from Space Shuttle: Lidar In-Space Technology Experiment (LITE). Laser Radar Technology and Applications I. – SPIE, 1986. – Т. 663. – С. 196-202.
- 26.Басов Н. Г., Кокурин Ю. Л. Лазерная локация Луны. Наука и человечество, 1986. - М.: Знание, 1986. - С. 262-277.
- 27.Георгиев Н. И., Нойберт Р., Татевян С. К., Хайретдинов К. А. Лазерные спутниковые дальномеры. Наука и человечество, 1989. - М.: Знание, 1989. - С. 314-327.
- 28.Pusztai Z., Hajder L. Accurate calibration of LiDAR-camera systems using ordinary boxes. InProceedings of the IEEE international conference on computer vision workshops 2017 (pp. 394-402).
- 29.Ismagilov A. O, Kalinichev A. A. Simulation of Single-Pixel Camera Method Application for mapping the Spatial Layout of Objects in LIDAR Technologies. Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics. 2025.
- 30.Hamzah R. A., Ibrahim H. Literature survey on stereo vision disparity map algorithms. Journal of Sensors. 2016;2016(1):8742920.
- 31.Fang L. Plenoptic Imaging and Processing. Springer Nature. 2025.
- 32.Давыдов С. П., Селезнева Н. Н. Экономика водного транспорта: учебник для студентов технических специальностей институтов водного транспорта. - М.: Транспорт, 1991. - 277 с. - с.273.

- 33.Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 февраля 2016 г. № 327-р.
- 34.Станкевич Л. А., Юрьевич Е. И. Искусственный интеллект и искусственный разум в робототехнике: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 167 с.
- 35.Antonelli D., Aliev K., Cascino S. Robotic assembly supported by feature-based vision system, Procedia CIRP, Volume 126, 2024, p. 799-804.
- 36.Zhang C., Pu J., Niu X. An Autonomous Robotic Alignment Strategy Based on Visual Guidance. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 612 (2019) 032123.
- 37.Лопатина В. В., Сенченко В. Г. Измерение продольного, поперечного и вертикального смещения подвижного объекта относительно стационарной базы. Эксплуатация морского транспорта №2(95). 2020. С. 31-34. DOI: 10.34046/aumsuomt95/5
- 38.Senchenko V., Lopatina V., Studenikin D., Butsanets A. Technical Automation Tools for High-Precision Navigating of Sea and River Ships. Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 130. Springer, Singapore. pp. 157-163  
[https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-33-6208-6_16)
- 39.СБОРНИК ОБЯЗАТЕЛЬНЫХ РАСПОРЯЖЕНИЙ ПО МОРСКОМУ ТОРГОВОМУ ПОРТУ НОВОРОССИЙСК (С ПРИПСНЫМ ПОРТПУНКТОМ АНАПА) И МОРСКОМУ ТОРГОВОМУ ПОРТУ ГЕЛЕНДЖИК. URL: [https://www.rosmorport.ru/media/File/nvr\\_rasp.pdf](https://www.rosmorport.ru/media/File/nvr_rasp.pdf)
- 40.Бутенко В. В., Лопатин М. С. Подходы к автоматизации погрузочно-разгрузочных работ в порту с применением систем дополненной реальности. - Математическое и компьютерное моделирование: материалы второй международной научно-практической конференции (г. Новороссийск, сентябрь 2016 г.). - РИО ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова.
- 41.Богданов А. Ф., Иванов И. А., Терехов П. М. Восстановление профиля поверхности катания колесных пар без выкатки. Бюллетень результатов научных исследований. С.-Петербург: изд. Петербургского государственного университета путей сообщения, 2014, №1, стр. 58-68.
- 42.Лопатина В. В., Сенченко В. Г. Разработка требований к оптической системе лазерно-оптического измерителя геометрических перемещений подвижного объекта. Эксплуатация морского транспорта №3(96). 2020. С. 100-106. DOI: 10.34046/aumsuomt96/13
- 43.Лопатина В. В., Сенченко В. Г. Методика проведения измерений геометрических перемещений подвижного объекта. Морские интеллектуальные технологии № 4 том 4, 2020. С. 62-65. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.098

- 44.Poujouly S., Journet B. A twofold modulation frequency laser range finder. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, № 4, pp. 356–363
- 45.Zheng X. Y., Zhao C., Zhang H. Y., Zheng Z., Yang H. Z. Coherent dual-frequency lidar system design for distance and speed measurements, *2017 International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications*, Vol. 10619. International Society for Optics and Photonics, 2018.
- 46.Jia F. X., Yu J. Y., Ding Z. L., Yuan F. Research on real-time laser range finding system. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 347. Trans Tech Publications, 2013.
- 47.Beraldin J.-A., Steenaart W. Overflow Analysis of a Fixed-Point Implementation of the Goertzel Algorithm. *IEEE Transactions on circuits and systems*, 1989, Vol. 36, No. 2, pp. 322–324.
- 48.Finlayson D.M., Sinclair B. *Advances in Lasers and Applications*. CRC Press, 1999, p. 346.
- 49.Александров В.В., Горский Н.Д. Представление и обработка изображений. Рекурсивный подход. М.: Наука, 1985.
- 50.Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Пер с англ. М.:Мир, 1982
- 51.Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Изд. 2-е. Изд.: «Машиностроение», 1969, 672 с.
- 52.Lopatina V. V. Method for Detecting Motion in a Frame and Identifying a Large Object. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 63, No. 4, pp. 695–703 (2024).  
<https://doi.org/10.1134/S1064230724700515>
- 53.Davies E. R. *Computer Vision*, Fifth Edition. Academic Press. 2017. - p. 900.
- 54.Лопатина В. В., Головачёва В. А., Савченко В. А. Выделение контуров в низкочастотной, среднечастотной и высокочастотной частях спектра графического сигнала. - Новое поколение в науке 2018. Матер. конф. "Новое поколение в науке - 2018". Информационные системы и технологии - 23 марта 2018 г.
- 55.Suzuki, Satoshi and Keiichi Abe. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Comput. Vis. Graph. Image Process.* 30 (1985): 32-46.
- 56.Group of methods Image Moments from library OpenCV 4.7.0
- 57.Weisstein E.W. (2002). *CRC Concise Encyclopedia of Mathematics* (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781420035223>
- 58.Ярославский Л. П. Введение в цифровую обработку изображений. М.: Сов. радио, 1979.
- 59.Bishop C. M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer. 2006. - p. 738.
- 60.Яншин В. В. Анализ и обработка изображений: принципы и алгоритмы. М.: Машиностроение, 1994.
- 61.Steven C.H. Hoi, Doyen Sahoo, Jing Lu, Peilin Zhao, Online learning: A comprehensive survey, *Neurocomputing*, Volume 459, 2021, pp 249-289, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2021.04.112>

- 62.Leon Bottou, 1998. Online learning and stochastic approximations. *Online learning in neural networks*, 17(9), p.142.
- 63.Lopatina V. V. Positioning of Large Objects by Computer Vision Methods. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 63, No. 5, pp. 833–843 (2024).  
<https://doi.org/10.1134/S106423072470059X>
- 64.Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений: пер. с англ. М.: Мир, 1989.
- 65.Бутаков Е.А. и др. Обработка изображений на ЭВМ. М.: Радио и связь, 1987.
- 66.Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов: Пер с англ М.: Мир, 1978
- 67.Гонсалес Р., Вудс Р. 2019. Цифровая обработка изображений. Издание 3-е, исправленное и дополненное. Москва: Техносфера, 2019. – 1104 с., ISBN 978-5-94836-331-8
- 68.Roger L. Easton Jr. Fourier Methods in Imaging. Wiley. 2010. - p. 960.
- 69.K. Arai, S. Kapoor. Advances in Computer Vision. Springer Cham. 2019. - p.767.
- 70.Grabner H, Bischof H 2006 On-line boosting and vision Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (vol 1) pp. 260–267.
- 71.Babenko B, Belongie S 2009 Visual tracking with online Multiple Instance Learning 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition pp. 983–990.
- 72.Henriques J.F, Caseiro R., Martins P., Batista J. 2015 High-speed tracking with kernelized correlation filters IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (37(3)) pp 583–596.
- 73.Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J 2010 Forward-backward error: Automatic detection of tracking failures Proceedings - International Conference on Pattern Recognition pp. 2756–2759.
- 74.Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J 2012 Tracking-Learning-Detection IEEE trans-actions on pattern analysis and machine intelligence (34(7)) pp. 1409–1422.
- 75.Lukezic A., Vojir T., Cehovin Zajc L 2018 Discriminative Correlation Filter Tracker with Channel and Spatial Reliability *Int J Comput Vis* (126) pp. 671–688.
- 76.Lopatina V. V. 2021 Method of fragment based tracking of displacement of a large areal object in images. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. 2061 pp. 012113.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2061/1/012113>
- 77.Bolme D. S, Beveridge J. R, Draper B. A., Lui Y. M, Visual object tracking using adaptive correlation filters, 2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Francisco, CA, USA, 2010, pp. 2544-2550, doi: 10.1109/CVPR.2010.5539960
- 78.Hecht E. 1987 Optics (2nd ed.). Addison-Wesley Publishing Company. - 676 p., ISBN 0-201-11609-X.
- 79.Senchenko V., Lopatina V., Butsanets A. Calculating the longitudinal and vertical displacements of a moving object by digital image processing methods. *E3S Web Conf.*, 258 (2021) 02005. pp. 11-21. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125802005>

- 80.Kalman R. E. 1960. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transaction of the ASME – Journal of Basic Engineering, pp. 35-45 (March 1960).
- 81.Greg Welch, Gary Bishop. 1995. An Introduction to the Kalman Filter. Technical Report. University of North Carolina at Chapel Hill, USA.
- 82.Grewal M. S., Andrews A. P., Kalman Filtering – Theory and Practice Using MATLAB, Wiley, 2001 DOI:[10.1002/9780470377819](https://doi.org/10.1002/9780470377819)
- 83.Стратонович Р. Л. Оптимальные нелинейные системы, осуществляющие выделение сигнала с постоянными параметрами из шума. Изв. вузов. Радиофизика. 1959. Т. 2, № 6. С. 892–901.
- 84.Стратонович Р. Л. К теории оптимальной нелинейной фильтрации случайных функций. Теория вероятностей и ее применения. 1959 №2. С.239-242.
- 85.Зинова В. В. Синтез и исследование алгоритмов фильтрации, применяемых на этапе вторичной обработки радиолокационной информации. Политехнический молодежный журнал. 2018. № 8(25), 13 р. DOI: [10.18698/2541-8009-2018-8-361](https://doi.org/10.18698/2541-8009-2018-8-361)
- 86.Лопатина В. В., Головачёва В. А., Савченко В. А. Определение характера движения на основе данных видеофрагмента. - Новое поколение в науке 2018. Матер. конф. "Новое поколение в науке - 2018". Информационные системы и технологии - 23 марта 2018 г.
- 87.Wang H., Bell D. Extended k-Nearest Neighbours Based on Evidence Theory. The Computer Journal, Vol. 47 (6) Nov. 2004, pp. 662-672.
- 88.Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. - 2-е изд. - М., 1962.
- 89.Митин И. В., Русаков В. С. Анализ и обработка экспериментальных данных. Учебно-методическое пособие для студентов младших курсов. – М.: Изд-во НЭВЦ ФИПТ. 1998. С. 48.

## Приложение А. Методика стендовых испытаний

В настоящем документе применяют следующие обозначения и сокращения:

ЕСКД – единая система конструкторской документации

КД – конструкторская документация

КИМП – комплектующие изделия межотраслевого применения

КСМГ – крупный силикагель мелкопористый гранулированный

НТД – нормативно-техническая документация

ОИ – оптические измерители

ПО – программное обеспечение

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ВСКП – высокоточная система контроля положения

ЭД – эксплуатационная документация

ЕАЭС – Евразийский экономический союз

### 1. Общие положения

#### 1.1 Наименование

Объектом испытаний является опытный образец высокоточной системы контроля положения (ВСКП).

#### 1.2 Цель испытаний

Целью испытаний является проверка соответствия заявленных характеристик ВСКП результатам стендовых испытаний.

Таблица 1. Заявленные характеристики ВСКП

Наименование	Погрешность	Примечание
Поперечное смещение	Не более $\pm 1$ мм на каждый метр дистанции	Зависимость точности от расстояния линейная: $\pm 20$ мм на дистанции в 20 м, $\pm 50$ мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей

Продольное смещение	Не более $\pm 2$ мм на каждый метр дистанции	Зависимость точности от расстояния линейная: $\pm 40$ мм на дистанции в 20 м, $\pm 100$ мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей
Вертикальное смещение	Не более $\pm 2$ мм на каждый метр дистанции	Зависимость точности от расстояния линейная: $\pm 40$ мм на дистанции в 20 м, $\pm 100$ мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей
Скорости сближения носа и кормы макета судна по отношению к линии измерений	Не более 0,05 м/с	
Угол положения макета судна по отношению к линии измерений	Не более $2^\circ$	

### 1.3 Состав опытного образца

На испытаниях предъявляется опытный образец высокоточной системы контроля положения (ВСКП).

Таблица 2. Состав опытного образца ВСКП

Наименование	Контролируемые параметры	Кол-во, шт.	Примечание
Оптические измерители	Продольное, поперечное и вертикальное смещение макета судна, скорости сближения носа и кормы макета судна с линией измерений, угол положения макета судна по отношению к линии измерений	2	Управляющий измеритель включает камеру компьютерного зрения, лазерный дальномер, компьютер для высокоскоростной обработки данных, промышленный маршрутизатор с 3G/4G (LTE), Wi-Fi модули для передачи данных. Управляемый измеритель включает камеру компьютерного зрения, лазерный дальномер.
Комплект конструкторской документации (КД)		1	
Комплект эксплуатационной документации (ЭД)		1	

## 2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

### 2.1 Требования к средствам проведения испытаний

При проведении испытаний используется следующее испытательное оборудование:

Таблица 3. Испытательное оборудование

Наименование	Тип, обозначение	Контролируемые параметры	Кол-во, шт.	Примечание
Мегаомметр переносной	На 100 и 500 В Диапазон измерений: 0 - 1000 Мом	Сопротивление изоляции	1	
Миллиомметр	Диапазон измеряемых сопротивлений: от 0,001 до 100 Ом	Заземление корпусов	1	
Контрольный лазерный дальномер в едином корпусе с микрокомпьютером	Погрешность измерений 1 мм, диапазон измерений 25 м.	Данные, выдаваемые оптическими измерителями (величины продольного, поперечного и вертикального смещения)	4	Используются поверенные лазерные дальномеры
Технологическая ЭВМ			1	Применяется для контроля и сравнения расчётных данных ВСКП с данными контрольных лазерных дальномеров
Макет судна (объект измерений)	Длина макета от 90 до 150 см, высота не менее 40 см.		1	
Подвижная платформа			1	Для дистанционного перемещения макета судна

## 2.2 Требования к подготовке ВСКП к испытаниям

Подключение составных частей ВСКП для проведения проверок осуществлять в соответствии со схемами, приведенными на рисунках ниже.

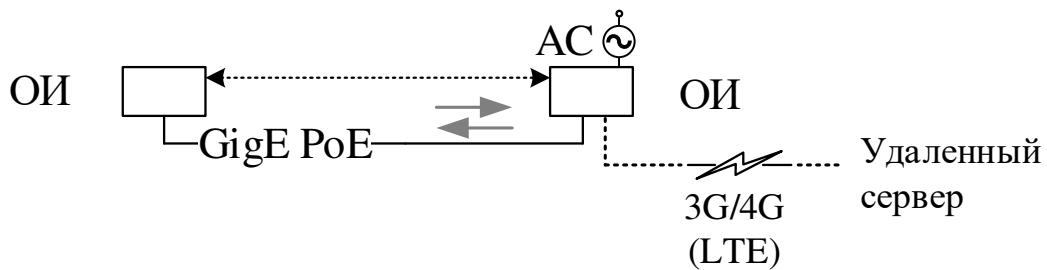


Рисунок 1. Схема подключения оптических измерителей  
(слева – управляемый ОИ, справа – управляющий)

Управляющий ОИ подключается к источнику переменного тока (AC). Управляемый ОИ получает питание по технологии Power over Ethernet (PoE). Обмен данными происходит по каналу связи стандарта Ethernet.

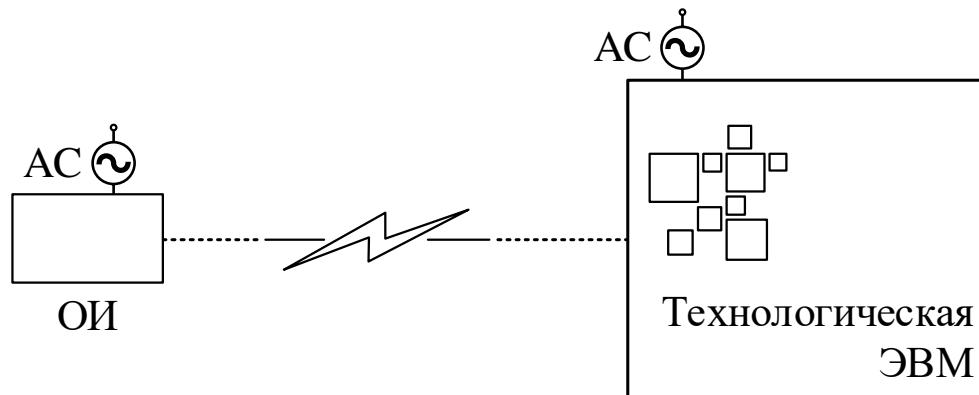


Рисунок 2. Схема подключения технологической ЭВМ и управляющего ОИ

Технологическая ЭВМ подключается к сети переменного тока (AC). Обмен данными между управляющим ОИ и технологической ЭВМ осуществляется по беспроводному каналу связи стандарта Wi-Fi.

ОИ устанавливаются на расстоянии 1 метр друг от друга. В прямой видимости оптических измерителей на подвижную платформу устанавливается макет судна.

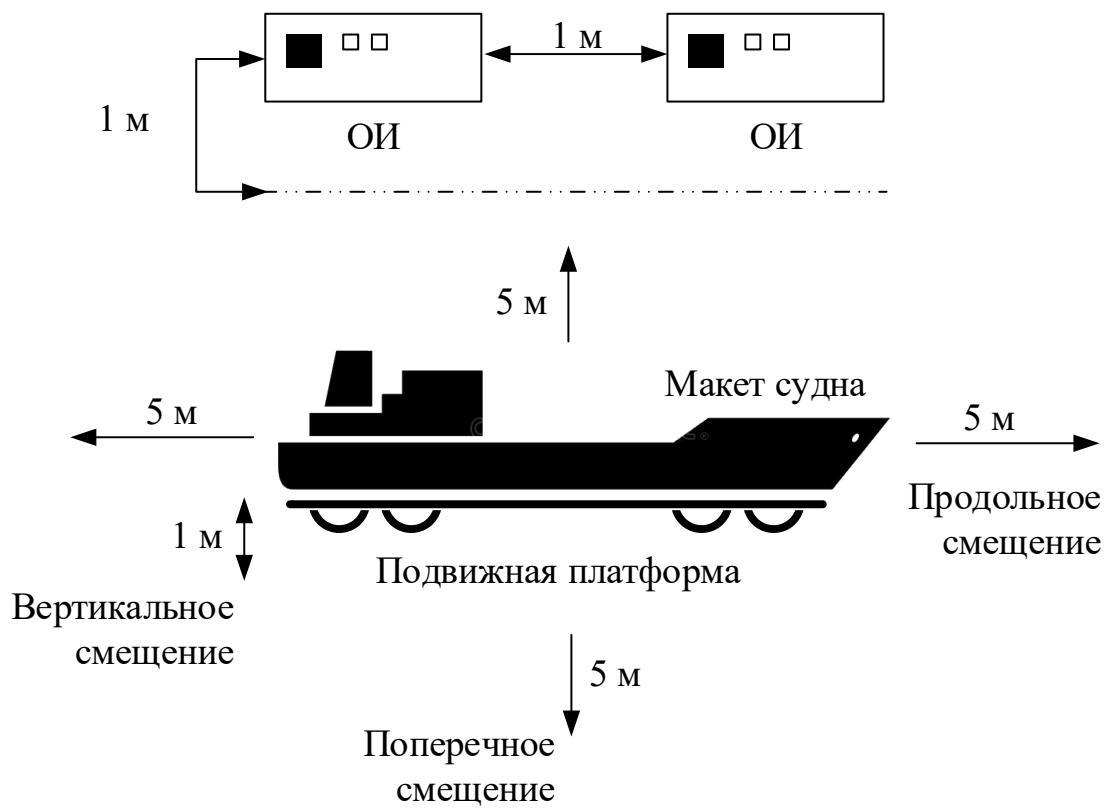


Рисунок 3. Схема установки макета судна в прямой видимости оптических измерителей

Подвижная платформа управляется дистанционно и позволяет выполнять поступательные перемещения в трёх плоскостях, а также вращение по горизонтальной оси.

Контрольные лазерные дальномеры устанавливаются на дистанции не более чем 3 метра от границ зоны измерений для измерения вертикального смещения, 5 метров для измерения горизонтального (продольного) смещения и на одном уровне с оптическими измерителями ВСКП для контрольных измерений поперечного смещения.

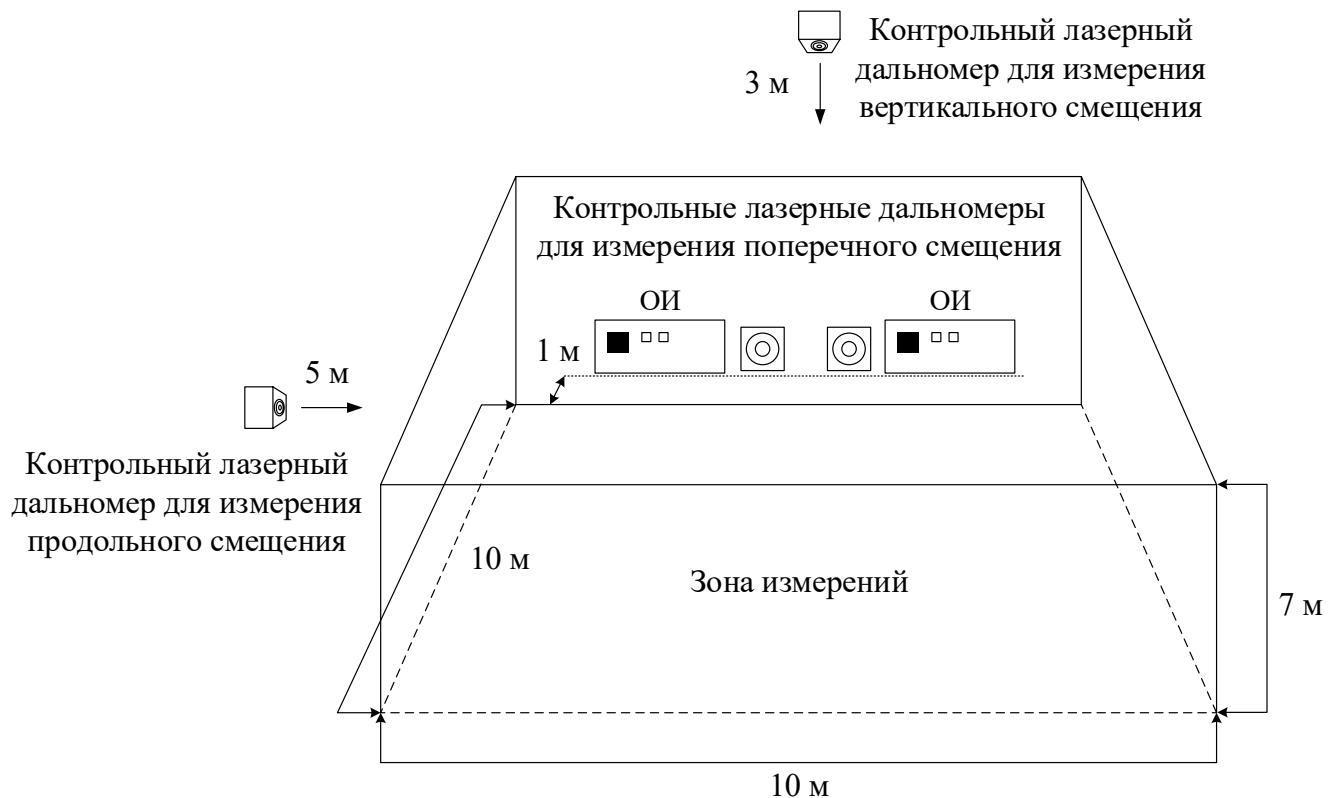


Рисунок 4. Схема установки контрольных лазерных дальномеров для измерения величин перемещений макета судна в трёх плоскостях

### 3. Определяемые показатели

#### 3.1 Перечень определяемых показателей

При проведении испытаний определяются количественные и качественные показатели свойств опытного образца ВСКП. Количественные и качественные показатели ВСКП определяются удовлетворительной оценкой результатов проверки в соответствии с критериями успешности. Перечень определяемых показателей ВСКП приведен в таблице ниже.

Таблица 4. Перечень определяемых показателей

№	Наименование испытаний и проверок	Номер пункта методов контроля
1	Проверка комплектности ВСКП	4.1
2	Проверка комплектности и качества КД и ЭД	4.2
3	Проверка соответствия ВСКП требованиям КД	4.3
4	Проверка сопротивления изоляции проводов и кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП	4.4

5	Проверка заземления корпусов составных частей ВСКП	4.5
6	Проверка работоспособности ВСКП	4.6
7	Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении поперечного смещения	4.7
8	Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении продольного смещения	4.8
9	Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении вертикального смещения	4.9
10	Проверка выполнения расчета скорости сближения носа и кормы судна по отношению к линии измерений	4.10
11	Проверка выполнения расчета угла положения судна по отношению к линии измерений	4.11
12	Проверка соответствия требованиям по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим)	4.12
13	Проверка соответствия требованиям по надежности, безотказности и долговечности	4.13
14	Проверка соответствия требованиям по радиоэлектронной защите (электромагнитной совместимости)	4.14
15	Проверка соответствия требованиям по эргономике и технической эстетике	4.15
16	Проверка соответствия требованиям по эксплуатации, удобству технического обслуживания, ремонта и хранения	4.16
17	Проверка соответствия требованиям по электропитанию	4.17
18	Проверка соответствия требованиям по безопасности	4.18
19	Проверка соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды	4.19

20	Проверка соответствия требованиям по унификации и стандартизации	4.20
21	Проверка соответствия требованиям по технологичности	4.21
22	Проверка соответствия требованиям к метрологическому обеспечению	4.22
23	Проверка соответствия требованиям к сырью, материалам и КИМП	4.23
24	Проверка соответствия требованиям по консервации, упаковке и маркировке	4.24
25	Проверка соответствия специальным требованиям	4.25
26	Проверка соответствия требованиям по транспортабельности	4.26

#### 4. Методы испытаний

##### 4.1 Проверка комплектности ВСКП

Проверку комплектности ВСКП провести путем сравнения комплектности ВСКП, приведенной в Таблица 2 с комплектностью ВСКП, представленной на испытаниях.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если комплектность ВСКП, указанная в Таблица 2, соответствуют комплектности ВСКП, представленной на испытаниях.

##### 4.2 Проверка комплектности и качества КД и ЭД

Проверку комплектности и качества КД провести путем сверки комплектности КД ВСКП с комплектностью КД, представленной на испытаниях.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- комплектность КД соответствует комплектности, представленной на испытаниях;
- КД на ВСКП соответствует требованиям ЕСКД, комплектна и находится в удовлетворительном состоянии.

##### 4.3 Проверка соответствия ВСКП требованиям КД

Проверку соответствия ВСКП требованиям КД провести путем визуального сличения:

- ВСКП, предъявленной на испытаниях, с конструкцией и требованиями, установленными в КД;
- внешнего вида ВСКП с габаритными, присоединительными и установочными размерами, указанными в габаритных чертежах.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- ВСКП соответствует конструкции и требованиям, установленным в КД;
- внешний вид ВСКП соответствует габаритным, присоединительным и установочным размерам, указанным в габаритных чертежах.

#### 4.4 Проверка сопротивления изоляции проводов и кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП

Проверку сопротивления изоляции проводов и кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП провести между отдельными жилами и наружной оболочкой кабеля. Измерение сопротивления изоляции жил силовых и радиочастотных кабелей провести 500-вольтным мегаомметром. При измерении сопротивления изоляции кабелей последние отсоединить от составных частей ВСКП с обоих концов. Измерение сопротивления изоляции жил кабелей, подключенных к составным частям ВСКП не с помощью соединителей, не проводить. Проверку сопротивления изоляции жил кабелей производить выборочно.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если сопротивление изоляции жил кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП по отношению к корпусным конструкциям имеет значение не менее 20 кОм на каждый вольт напряжения мегаомметра.

#### 4.5 Проверка заземления корпусов составных частей ВСКП

Проверку заземления корпусов составных частей ВСКП провести миллиомметром (мультиметром), щупы которого присоединить следующим образом: один - к зажиму заземления «» испытуемой составной части ВСКП, другой – к защищенному участку кронштейна вблизи данного прибора. Измерения производить выборочно.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если сопротивление защитного заземления ее составных частей не превышает 20 мОм.

#### 4.6 Проверка работоспособности ВСКП

Проверку работоспособности ВСКП провести в следующей последовательности:

- включить оптические измерители ВСКП;

- включить технологическую ЭВМ;
- запустить ПО технологической ЭВМ для управления и настройки ВСКП;
- дождаться статуса «Активна» рядом с идентификатором опытного образца ВСКП, участвующего в испытаниях. До появления статуса, происходит автоматическая проверка работоспособности всей системы и проверка обмена данными между опытным образцом ВСКП и технологической ЭВМ.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если опытный образец ВСКП активен и обменивается данными с технологической ЭВМ.

#### 4.7 Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении поперечного смещения

Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении поперечного смещения выполняется путем сравнения данных ВСКП и данных контрольных лазерных дальномеров, установленных для измерения поперечного смещения макета судна.

На этапе этой проверки, контрольные лазерные дальномеры уже должны быть подключены для сверки данных с данными опытного образца ВСКП. А в ПО технологической ЭВМ у каждого контрольного лазерного дальномера должен быть статус «Активен».

Для проверки обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении поперечного смещения необходимо в течение 2-4 минут дистанционно перемещать платформу с установленным на ней макетом судна в поперечном направлении, при этом, при необходимости добавить вращение по и против часовой стрелки не более чем на  $15^\circ$ . Скорость перемещения варьировать от нуля до максимальной скорости подвижной платформы (максимальная скорость платформы 12 км/ч в поперечном направлении). Результаты измерений контролировать на экране технологической ЭВМ.

Проверку повторить не менее 3 раз.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между измерениями поперечного смещения ОИ ВСКП и измерениями контрольными лазерными дальномерами не более  $\pm 1$  мм на каждый метр дистанции. Зависимость точности от расстояния линейная:  $\pm 20$  мм на дистанции в 20 м,  $\pm 50$  мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей.

#### **4.8 Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении продольного смещения**

Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении продольного смещения выполняется путем сравнения данных ВСКП и контрольного лазерного дальномера, установленного для измерения продольного смещения макета судна.

Для этого в течение 2-4 минут дистанционно перемещать платформу с установленным на ней макетом судна в продольном направлении, при этом, при необходимости добавить вращение по и против часовой стрелки не более чем на  $15^{\circ}$ . Скорость перемещения варьировать от нуля до максимальной скорости подвижной платформы (максимальная скорость платформы 12 км/ч в продольном направлении). Результаты измерений контролировать на экране технологической ЭВМ.

Проверку повторить не менее 3 раз.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между измерениями продольного смещения ОИ ВСКП и измерениями контрольного лазерного дальномера не более  $\pm 2$  мм на каждый метр дистанции. Зависимость точности от расстояния линейная:  $\pm 40$  мм на дистанции в 20 м,  $\pm 100$  мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей.

#### **4.9 Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении вертикального смещения**

Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении вертикального смещения выполняется путем сравнения данных ВСКП и контрольного лазерного дальномера, установленного для измерения вертикального смещения макета судна.

Для этого в течение 2-4 минут дистанционно перемещать платформу с установленным на ней макетом судна в вертикальном направлении не более чем на 1 метр в высоту. Результаты измерений контролировать на экране технологической ЭВМ.

Проверку повторить не менее 3 раз.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между измерениями вертикального смещения ОИ ВСКП и измерениями контрольного лазерного дальномера не более  $\pm 2$  мм на каждый метр дистанции. Зависимость точности от расстояния линейная:  $\pm 40$  мм на дистанции в 20 м,  $\pm 100$  мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей.

#### **4.10 Проверка выполнения расчета скорости сближения носа и кормы судна по отношению к линии измерений**

Проверка скорости сближения носа и кормы макета судна по отношению к линии измерений проводится по итогам сравнения рассчитанных скоростей по данным измерений продольного и поперечного смещения одновременно ВСКП и контрольными лазерными дальномерами.

Методы измерений указаны в пункте 4.7 и 4.8. Отдельно проверяется скорость сближения носа и скорость сближения кормы макета судна с линией измерений. Размеры макета судна и его ориентация в пространстве известны заранее.

Сравниваются скорости, рассчитанные по итогам измерений ВСКП и измерений контрольных лазерных дальномеров. Результаты измерений контролировать на экране технологической ЭВМ.

Проверку повторить не менее 6 раз.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между скоростью сближения носа и кормы макета судна по отношению к линии измерений рассчитанная ВСКП и контрольными лазерными дальномерами не более 0,05 м/с.

#### **4.11 Проверка выполнения расчета угла положения судна по отношению к линии измерений**

Проверка расчёта угла положения макета судна по отношению к линии измерений проводится по итогам сравнения рассчитанных углов по данным измерений поперечного смещения одновременно ОИ ВСКП и контрольными лазерными дальномерами.

Метод измерений указан в пункте 4.7. Сравниваются углы, рассчитанные по итогам измерений ВСКП и контрольных лазерных дальномеров. Результаты измерений контролировать на экране технологической ЭВМ.

Проверку повторить не менее 6 раз.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между углом положения макета судна по отношению к линии измерений рассчитанная ВСКП и контрольными лазерными дальномерами составляет не более  $2^\circ$ .

#### **4.12 Проверка соответствия требованиям по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим)**

Проверку соответствия требованиям по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим) провести путем рассмотрения сертификата ЕАЭС на корпусные конструкции ВСКП.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если имеются сертификат ЕАЭС, подтверждающий соответствие корпусных конструкций ВСКП требованиям ЕАЭС по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим).

#### 4.13 Проверка соответствия требованиям по надежности, безотказности и долговечности

Проверку соответствия требованиям по надежности провести путем оценки показателей надежности по расчету надежности, проведенному в соответствии с требованиями НТД.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если по расчету показатели надежности, безотказности и долговечности обеспечивают:

- среднюю наработку на отказ не менее 5000 ч;
- среднее время восстановления на объекте эксплуатации силами и средствами дежурной смены не более 0,25 ч;
- средний срок службы не менее 10 лет;
- средний срок сохраняемости в заводской упаковке в отапливаемом помещении не менее 1 года.

#### 4.14 Проверка соответствия требованиям по радиоэлектронной защите (электромагнитной совместимости)

Проверку соответствия требованиям по радиоэлектронной защите (электромагнитной совместимости) провести путем рассмотрения соответствующих сертификатов.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если имеются сертификаты, подтверждающие электромагнитную совместимость составных частей ВСКП.

#### 4.15 Проверка соответствия требованиям по эргономике и технической эстетике

Проверку соответствия требованиям эргономики, технической эстетики провести путем проверки соответствия составных частей ВСКП требованиям ГОСТ 20.39.108-85.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- эксплуатация ВСКП соответствует требованиям ГОСТ 20.39.108-85;
- при разработке ВСКП учтены эргономические требования в части удобства обслуживания, управления и организации рабочих мест при ремонте;

- обеспечено выполнение норм и требований к социально-психологическим факторам, обеспечивающим сохранение здоровья и работоспособности личного состава.

#### 4.16 Проверка соответствия требованиям по эксплуатации, удобству технического обслуживания, ремонта и хранения

Проверку соответствия требованиям к удобству технического обслуживания и ремонту провести рассмотрением руководств по эксплуатации на ВСКП и расчета комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей на полноту и достаточность.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- в руководствах по эксплуатации изложены указания по порядку эксплуатации ВСКП, проведения технического обслуживания, определен объем и периодичность технического обслуживания, трудоемкость, необходимые материалы и инструменты;
- состав комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей обеспечивает выполнение текущего ремонта в процессе эксплуатации силами личного состава.

#### 4.17 Проверка соответствия требованиям по электропитанию

Проверку соответствия требованиям по электропитанию провести согласно соответствующим методикам, приведенным в ЭД.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если при аварийном отключении от сети или отклонении параметров сети за нормы, приведенные в ГОСТ Р 58874-2020, не происходит отказ ВСКП, кроме их отключения.

#### 4.18 Проверка соответствия требованиям по безопасности

Проверку выполнения требования по безопасности (защитного заземления) провести путем визуального осмотра.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- болты защитного заземления составных частей ВСКП не имеют лакокрасочного покрытия;
- около болтов защитного заземления составных частей нанесен знак заземления по ГОСТ 25874.

#### **4.19 Проверка соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды**

Проверку соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды при работе с ВСКП провести путем рассмотрения сертификатов соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды на ВСКП и ее составные части.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если на ВСКП имеются сертификаты соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды действующих российских стандартов.

#### **4.20 Проверка соответствия требованиям по унификации и стандартизации**

Проверку соответствия требованиям унификации и стандартизации провести рассмотрением «Заключения об уровне унификации и стандартизации» ВСКП в части применения стандартных и унифицированных материалов, компонентов, узлов и деталей.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если применяются унифицированные и стандартные материалы, компоненты, узлы и детали.

#### **4.21 Проверка соответствия требованиям по технологичности**

Проверку соответствия требованиям по технологичности ВСКП провести рассмотрением «Заключения по результатам экспертизы по технологичности» ВСКП в части обеспечения возможности последующего серийного производства на специализированном российском предприятии.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если в «Заключении по результатам экспертизы на соответствие требованиям по технологичности» присутствует обоснование обеспечения возможности применения прогрессивных технологических процессов производства, автоматизации и механизации, обеспечения серийного производства, технологичности сборки в соответствии с требованиями применения прогрессивных технологий с учетом требований ГОСТ 14.201-83.

#### **4.22 Проверка соответствия требованиям к метрологическому обеспечению**

Проверку соответствия требованиям к метрологическому обеспечению провести путем рассмотрения заключения по результатам проведения метрологической экспертизы ВСКП на соответствие требованиям действующих российских стандартов.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если в заключении по результатам проведения метрологической экспертизы подтверждено соответствие ВСКП требованиям действующих российских стандартов и указано, что все датчики из состава имеют сертификаты и свидетельства о поверке.

#### 4.23 Проверка соответствия требованиям к сырью, материалам и КИМП

Проверку соответствия требованиям к сырью, материалам и КИМП провести путем проверки даты выпуска комплектующих элементов и материалов по маркировке и данным, указанным в ЭД.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если она и ее СЧ обеспечивают следующее: покупные изделия и материалы имеют израсходованный срок хранения не более 1/3 установленного на них техническими условиями полного срока сохраняемости, применяемые материалы и покупные изделия, на которые срок сохраняемости не установлен, применены со сроком хранения с момента выпуска не более двух лет.

#### 4.24 Проверка соответствия требованиям по консервации, упаковке и маркировке

Проверку соответствия требованиям по консервации, упаковке и маркировке провести путем рассмотрения КД и ЭД на ВСКП на соответствие требованиям ГОСТ 15150-69, категория «Ж2». Состояние маркировки оценивается в ходе испытаний.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- в КД обозначены содержание и места маркировки ВСКП и упаковки;
- надписи соответствуют требованиям ГОСТ 23090-78 и ОСТ 107.460024.001-90;
- маркировка нанесена на несъемных частях ВСКП, доступных для обзора;
- маркировка устойчива в течение всего срока службы ВСКП, механически прочная;
- обозначения электрических соединителей позволяют определить сопрягаемые части соединителей;
- обозначения нанесены непосредственно на корпуса сопрягаемых частей соединителей или на кабели и панели терминалов около частей соединителей;
- электрорадиоизделия на плате обозначены в соответствии с обозначениями на принципиальной электрической схеме;
- в КД и ЭД предусмотрены меры внешней противокоррозионной защиты, указаны условия хранения в соответствии с ГОСТ 15150-69, срок хранения ВСКП,

- а также срок хранения без переконсервации, требования к упаковке для обеспечения транспортирования всеми видами транспорта в средних условиях, установленных ГОСТ 15150-69;
- упаковка разработана в соответствии с требованиями ГОСТ 23216-78;
- упаковка ВСКП защищает от:
  - а) проникновения атмосферных осадков,
  - б) проникновения пыли.

Перед упаковкой ВСКП и ее комплектующие должны быть подвергнуты временной противокоррозионной защите, вариант защиты ВЗ-10 с применением силикагеля КСМГ в необходимом количестве.

#### 4.25 Проверка соответствия специальным требованиям

Проверку соответствия специальным требованиям провести путем рассмотрения КД и ЭД на ВСКП на соответствие требованиям наличия имитаторов и/или технологических приспособлений, позволяющих провести испытания ВСКП в составе средств автономного судовождения.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если имеется комплект имитаторов и/или технологических приспособлений, позволяющих провести испытания ВСКП в составе средств автономного судовождения. Имитаторы и/или технологические приспособления аттестованы для проведения испытаний установленным порядком.

#### 4.26 Проверка соответствия требованиям по транспортабельности

Проверку соответствия требованиям по транспортабельности провести путем рассмотрения ЭД на ВСКП.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если в ЭД допускается транспортировка ВСКП в таре завода-изготовителя всеми видами транспорта, имеющими грузовое пространство соответствующего объема, предельная дальность и скорость не устанавливаются.

## Приложение Б. Методика натурных испытаний

В настоящем документе применяют следующие обозначения и сокращения:

ЕСКД – единая система конструкторской документации

КД – конструкторская документация

КИМП – комплектующие изделия межотраслевого применения

КСМГ – крупный силикагель мелкопористый гранулированный

НТД – нормативно-техническая документация

ОИ – оптические измерители

ПО – программное обеспечение

ЭВМ – электронно-вычислительная машина

ВСКП – высокоточная система контроля положения

ЭД – эксплуатационная документация

ЕАЭС – Евразийский экономический союз

### 1. Общие положения

#### 1.1 Наименование

Объектом испытаний является опытный образец высокоточной системы контроля положения (ВСКП).

#### 1.2 Цель испытаний

Целью испытаний является проверка соответствия заявленных характеристик ВСКП результатам натурных испытаний.

Таблица 5. Заявленные характеристики ВСКП

Наименование	Погрешность	Примечание
Поперечное смещение	Не более $\pm 1$ мм на каждый метр дистанции	Зависимость точности от расстояния линейная: $\pm 20$ мм на дистанции в 20 м, $\pm 50$ мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей

Продольное смещение	Не более $\pm 2$ мм на каждый метр дистанции	Зависимость точности от расстояния линейная: $\pm 40$ мм на дистанции в 20 м, $\pm 100$ мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей
Вертикальное смещение	Не более $\pm 2$ мм на каждый метр дистанции	Зависимость точности от расстояния линейная: $\pm 40$ мм на дистанции в 20 м, $\pm 100$ мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей
Скорости сближения носа и кормы судна по отношению к линии причала	Не более 0,05 м/с	
Угол положения судна по отношению к линии причала	Не более $2^\circ$	

### 1.3 Состав опытного образца

На испытаниях предъявляется опытный образец высокоточной системы контроля положения (ВСКП).

Таблица 6. Состав опытного образца ВСКП

Наименование	Контролируемые параметры	Кол-во, шт.	Примечание
Оптические измерители	Продольное, поперечное и вертикальное смещение судна, скорости сближения носа и кормы судна с линией измерений, угол положения судна по отношению к линии измерений	2	Управляющий измеритель включает камеру компьютерного зрения, лазерный дальномер, компьютер для высокоскоростной обработки данных, промышленный маршрутизатор с 3G/4G (LTE), Wi-Fi модули для передачи данных. Управляемый измеритель включает камеру компьютерного зрения, лазерный дальномер.
Комплект конструкторской документации (КД)		1	
Комплект эксплуатационной документации (ЭД)		1	

## 2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний

### 2.1 Требования к средствам проведения испытаний

При проведении испытаний используется следующее испытательное оборудование:

Таблица 7. Испытательное оборудование

Наименование	Тип, обозначение	Контролируемые параметры	Кол-во, шт.	Примечание
Мегаомметр переносной	На 100 и 500 В Диапазон измерений: 0 - 1000 Мом	Сопротивление изоляции	1	
Миллиомметр	Диапазон измеряемых сопротивлений: от 0,001 до 100 Ом	Заземление корпусов	1	
Контрольный лазерный дальномер в едином корпусе с микрокомпьютером	Погрешность измерений не более $\pm 3$ мм ( $0,5 \sim 100$ м), $\pm 5$ мм ( $100 \sim 400$ м), $\pm 8$ мм ( $>400$ м)	Проверка продольного и поперечного смещения измеряемого объекта (морского судна)	3	Используются поверенные лазерные дальномеры
Технологическая ЭВМ			1	Применяется для контроля и сравнения расчётных данных ВСКП с данными контрольных лазерных дальномеров
Морское судно (объект измерений)			1	

## 2.2 Требования к подготовке ВСКП к испытаниям

Установку ВСКП на причале и подключение ВСКП для проведения испытаний осуществить в соответствии со схемами, приведенными на рисунках ниже.

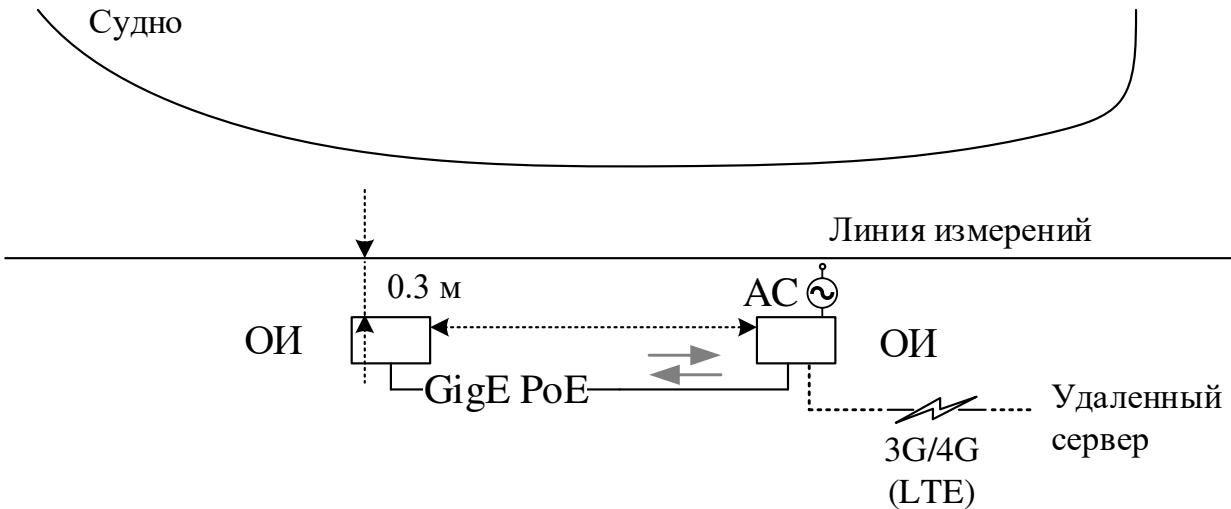


Рисунок 5. Схема установки оптических измерителей на причале  
(слева – управляемый ОИ, справа – управляющий)

ОИ устанавливаются на расстоянии 0,3 м от линии измерений, проходящей в данном случае по краю причала, расстояние между оптическими измерителями 25 м. Управляющий ОИ подключается к источнику переменного тока (AC). Управляемый ОИ получает питание по технологии Power over Ethernet (PoE). Обмен данными происходит по каналу связи стандарта Ethernet.

Обмен данными между управляющим ОИ и удаленным сервером осуществляется по каналу связи 3G/4G (LTE). Технологическая ЭВМ имеет автономный источник постоянного тока (DC) в виде аккумуляторной батареи.

Контрольные лазерные дальномеры для контроля измерений поперечного смещения устанавливаются на одной линии с ОИ. Для контроля измерений продольного смещения на берегу или на выступающих частях причала перпендикулярно причалу устанавливается контрольный лазерный дальномер.



Рисунок 6. Схема установки контрольных лазерных дальномеров для контроля поперечного смещения судна

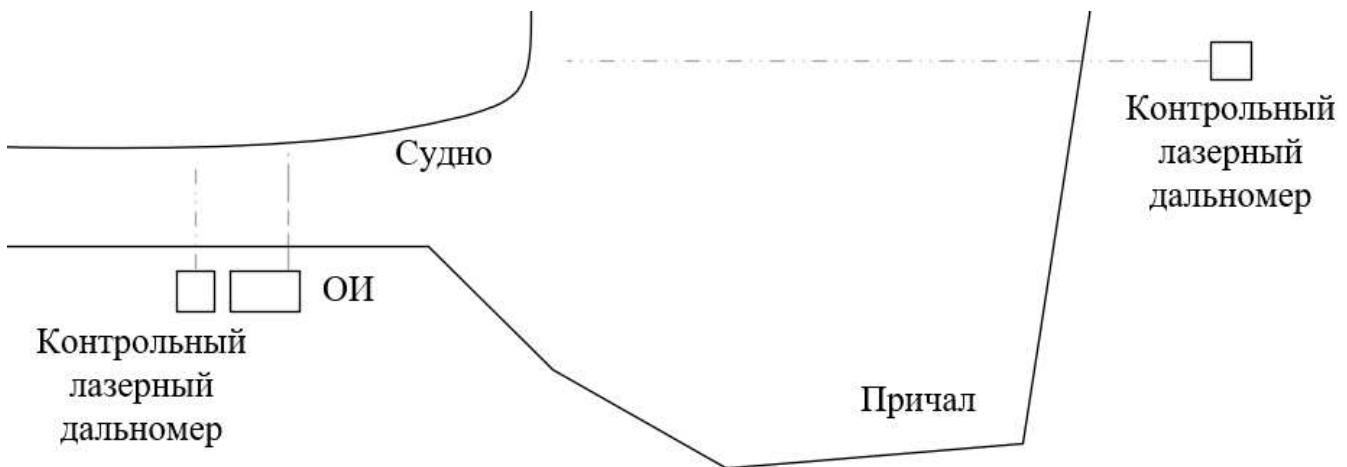


Рисунок 7. Схема установки контрольного лазерного дальномера для контроля продольного смещения судна

Каждый контрольный лазерный дальномер подключён к микрокомпьютеру, выполняющему функцию отправки данных на удалённый сервер для сверки с данными поступающими от оптических измерителей ВСКП.

### 3. Определяемые показатели

#### 3.1 Перечень определяемых показателей

При проведении испытаний определяются количественные и качественные показатели свойств опытного образца ВСКП. Количественные и качественные показатели ВСКП определяются удовлетворительной оценкой результатов проверки в соответствии с критериями успешности. Перечень определяемых показателей ВСКП приведен в таблице ниже.

Таблица 8. Перечень определяемых показателей

№	Наименование испытаний и проверок	Номер пункта методов контроля
27	Проверка комплектности ВСКП	4.27
28	Проверка комплектности и качества КД и ЭД	4.28
29	Проверка соответствия ВСКП требованиям КД	4.29
30	Проверка сопротивления изоляции проводов и кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП	4.30
31	Проверка заземления корпусов составных частей ВСКП	4.31
32	Проверка работоспособности ВСКП	4.32
33	Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении поперечного смещения	4.33
34	Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении продольного смещения	4.34
35	Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении вертикального смещения	4.35
36	Проверка выполнения расчета скорости сближения носа и кормы судна по отношению к линии причала	4.36
37	Проверка выполнения расчета угла положения судна по отношению к линии причала	4.37
38	Проверка соответствия требованиям по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим)	4.38
39	Проверка соответствия требованиям по надежности, безотказности и долговечности	4.39
40	Проверка соответствия требованиям по радиоэлектронной защите (электромагнитной совместимости)	4.40

41	Проверка соответствия требованиям по эргономике и технической эстетике	4.41
42	Проверка соответствия требованиям по эксплуатации, удобству технического обслуживания, ремонта и хранения	4.42
43	Проверка соответствия требованиям по электропитанию	4.43
44	Проверка соответствия требованиям по безопасности	4.44
45	Проверка соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды	4.45
46	Проверка соответствия требованиям по унификации и стандартизации	4.46
47	Проверка соответствия требованиям по технологичности	4.47
48	Проверка соответствия требованиям к метрологическому обеспечению	4.48
49	Проверка соответствия требованиям к сырью, материалам и КИМП	4.49
50	Проверка соответствия требованиям по консервации, упаковке и маркировке	4.50
51	Проверка соответствия специальным требованиям	4.51
52	Проверка соответствия требованиям по транспортабельности	4.52

#### 4. Методы испытаний

##### 4.1 Проверка комплектности ВСКП

Проверку комплектности ВСКП провести путем сравнения комплектности ВСКП, приведенной в Таблица 2 с комплектностью ВСКП, представленной на испытаниях.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если комплектность ВСКП, указанная в Таблица 2, соответствуют комплектности ВСКП, представленной на испытаниях.

#### **4.2 Проверка комплектности и качества КД и ЭД**

Проверку комплектности и качества КД провести путем сверки комплектности КД ВСКП с комплектностью КД, представленной на испытаниях.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- комплектность КД соответствует комплектности, представленной на испытаниях;
- КД на ВСКП соответствует требованиям ЕСКД, комплектна и находится в удовлетворительном состоянии.

#### **4.3 Проверка соответствия ВСКП требованиям КД**

Проверку соответствия ВСКП требованиям КД провести путем визуального сличения:

- ВСКП, предъявленной на испытаниях, с конструкцией и требованиями, установленными в КД;
- внешнего вида ВСКП с габаритными, присоединительными и установочными размерами, указанными в габаритных чертежах.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- ВСКП соответствует конструкции и требованиям, установленным в КД;
- внешний вид ВСКП соответствует габаритным, присоединительным и установочным размерам, указанным в габаритных чертежах.

#### **4.4 Проверка сопротивления изоляции проводов и кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП**

Проверку сопротивления изоляции проводов и кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП провести между отдельными жилами и наружной оболочкой кабеля. Измерение сопротивления изоляции жил силовых и радиочастотных кабелей провести 500-вольтным мегаомметром. При измерении сопротивления изоляции кабелей последние отсоединить от составных частей ВСКП с обоих концов. Измерение сопротивления изоляции жил кабелей, подключенных к составным частям ВСКП не с помощью соединителей, не проводить. Проверку сопротивления изоляции жил кабелей производить выборочно.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если сопротивление изоляции жил кабелей внешнего монтажа составных частей ВСКП по отношению к корпусным конструкциям имеет значение не менее 20 кОм на каждый вольт напряжения мегаомметра.

#### 4.5 Проверка заземления корпусов составных частей ВСКП

Проверку заземления корпусов составных частей ВСКП провести миллиомметром (мультиметром), щупы которого присоединить следующим образом: один - к зажиму заземления «» испытуемой составной части ВСКП, другой – к защищенному участку кронштейна вблизи данного прибора. Измерения производить выборочно.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если сопротивление защитного заземления ее составных частей не превышает 20 мОм.

#### 4.6 Проверка работоспособности ВСКП

Проверку работоспособности ВСКП провести в следующей последовательности:

- включить оптические измерители ВСКП;
- включить технологическую ЭВМ;
- запустить ПО технологической ЭВМ для управления и настройки ВСКП;
- дождаться статуса «Активна» рядом с идентификатором опытного образца ВСКП, участвующего в испытаниях. До появления статуса, происходит автоматическая проверка работоспособности всей системы и проверка обмена данными между опытным образцом ВСКП и технологической ЭВМ.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если опытный образец ВСКП активен и обменивается данными с технологической ЭВМ.

#### 4.7 Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении поперечного смещения

Проверку обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении поперечного смещения провести путем сравнения данных, получаемых от ВСКП и контрольных лазерных дальномеров.

Контрольные лазерные дальномеры в соответствии со схемой установки, представленной на Рисунок 6, устанавливаются на одной линии с ОИ ВСКП. На протяжении всего испытания контрольные лазерные дальномеры отправляют данные на удаленный сервер. Дополнительного взаимодействия с контрольными лазерными дальномерами не требуется.

**Порядок испытания:**

- запустить ПО технологической ЭВМ для мониторинга движения судна, контроля и анализа данных с ОИ ВСКП и контрольных лазерных дальномеров;
- в ПО технологической ЭВМ необходимо выбрать режим «Контроль поперечного смещения судна»;
- судно выполняет подход к причалу на допустимой скорости (от 0 до 3 узлов в час);
- по завершению манёвра привала судна, необходимо нажать кнопку «Анализ поперечного смещения судна», на экране технологической ЭВМ откроется сводная таблица анализа поперечного смещения судна.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между измерениями поперечного смещения ОИ ВСКП и измерениями контрольных лазерных дальномеров не более  $\pm 1$  мм на каждый метр дистанции. Зависимость точности от расстояния линейная:  $\pm 20$  мм на дистанции в 20 м,  $\pm 50$  мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей.

Проверку повторить не менее 3 раз.

#### 4.8 Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении продольного смещения

Проверку обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении продольного смещения провести путем сравнения данных, получаемых от ВСКП и контрольного лазерного дальномера.

Контрольный лазерный дальномер в соответствии со схемой установки, представленной на Рисунок 7, устанавливается на берегу или на выступающих частях причала перпендикулярно к линии причала. На протяжении всего испытания контрольный лазерный дальномер отправляет данные на удаленный сервер. Дополнительного взаимодействия с контрольным лазерным дальномером не требуется.

**Порядок испытания:**

- запустить ПО технологической ЭВМ для мониторинга движения судна, контроля и анализа данных с ОИ ВСКП и контрольного лазерного дальномера;
- в ПО технологической ЭВМ необходимо выбрать режим «Контроль продольного смещения судна»;
- судно выполняет движение вдоль причала на допустимой скорости (от 0 до 3 узлов в час);

- по завершению движения судна, необходимо нажать кнопку «Анализ продольного смещения судна», на экране технологической ЭВМ откроется сводная таблица анализа продольного смещения судна.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между измерениями продольного смещения ОИ ВСКП и измерениями контрольного лазерного дальномера не более  $\pm 2$  мм на каждый метр дистанции. Зависимость точности от расстояния линейная:  $\pm 40$  мм на дистанции в 20 м,  $\pm 100$  мм на дистанции в 50 м и далее по возрастающей.

Проверку повторить не менее 3 раз.

#### 4.9 Проверка обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении вертикального смещения

Проверку обеспечения характеристик оптических измерителей при измерении вертикального смещения провести путем визуального контроля данных, получаемых от ВСКП в ПО технологической ЭВМ.

Для проверки вертикального смещения судна контрольный лазерный дальномер не предусмотрен, т.к. алгоритм выполняющий расчёт продольного смещения соответствует алгоритму расчёта вертикального смещения. Несоответствие расчётных величин продольного смещения ОИ данным контрольного дальномера будет говорить о неточности в расчёте вертикального смещения.

Порядок испытания:

- запустить ПО технологической ЭВМ для мониторинга движения судна, контроля и анализа данных с ОИ ВСКП;
- судно выполняет подход к причалу на допустимой скорости (от 0 до 3 узлов в час);
- в ходе манёвра привала судна проверяющий контролирует вывод данных на экране технологической ЭВМ.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если выдержаны проверка в 4.8 и данные вертикального смещения выводятся в ПО технологической ЭВМ.

#### 4.10 Проверка выполнения расчета скорости сближения носа и кормы судна по отношению к линии причала

Проверка скорости сближения носа и кормы судна по отношению к линии причала проводится по итогам сравнения рассчитанных скоростей по данным измерений продольного и поперечного смещения одновременно ВСКП и контрольными лазерными дальномерами.

Методы измерений указаны в пункте 4.7 и 4.8. Отдельно проверяется скорость сближения носа и скорость сближения кормы судна с линией причала. Размеры судна и его ориентация в пространстве известны заранее.

Сравниваются скорости, рассчитанные по итогам измерений ОИ ВСКП и измерений контрольных лазерных дальномеров. Результаты измерений контролировать на экране технологической ЭВМ.

Проверку повторить не менее 6 раз.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между скоростью сближения носа и кормы судна по отношению к линии измерений рассчитанная ОИ ВСКП и контрольными лазерными дальномерами не более 0,05 м/с.

#### 4.11 Проверка выполнения расчета угла положения судна по отношению к линии причала

Проверка расчёта угла положения судна по отношению к линии причала проводится по итогам сравнения рассчитанных углов по данным измерений поперечного смещения одновременно оптическими измерителями ВСКП и контрольными лазерными дальномерами.

Метод измерений указан в пункте 4.7. Сравниваются углы, рассчитанные по итогам измерений ОИ ВСКП и контрольных лазерных дальномеров. Результаты измерений контролировать на экране технологической ЭВМ.

Проверку повторить не менее 6 раз.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если разница между углом положения судна по отношению к линии измерений рассчитанная ОИ ВСКП и контрольными лазерными дальномерами составляет не более  $2^\circ$ .

#### 4.12 Проверка соответствия требованиям по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим)

Проверку соответствия требованиям по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим) провести путем рассмотрения сертификата ЕАЭС на корпусные конструкции ВСКП.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если имеются сертификат ЕАЭС, подтверждающий соответствие корпусных конструкций ВСКП требованиям ЕАЭС по живучести и стойкости к внешним воздействиям (механическим, климатическим).

#### **4.13 Проверка соответствия требованиям по надежности, безотказности и долговечности**

Проверку соответствия требованиям по надежности провести путем оценки показателей надежности по расчету надежности, проведенному в соответствии с требованиями НТД.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если по расчету показатели надежности, безотказности и долговечности обеспечивают:

- среднюю наработку на отказ не менее 5000 ч;
- среднее время восстановления на объекте эксплуатации силами и средствами дежурной смены не более 0,25 ч;
- средний срок службы не менее 10 лет;
- средний срок сохраняемости в заводской упаковке в отапливаемом помещении не менее 1 года.

#### **4.14 Проверка соответствия требованиям по радиоэлектронной защите (электромагнитной совместимости)**

Проверку соответствия требованиям по радиоэлектронной защите (электромагнитной совместимости) провести путем рассмотрения соответствующих сертификатов.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если имеются сертификаты, подтверждающие электромагнитную совместимость составных частей ВСКП.

#### **4.15 Проверка соответствия требованиям по эргономике и технической эстетике**

Проверку соответствия требованиям эргономики, технической эстетики провести путем проверки соответствия составных частей ВСКП требованиям ГОСТ 20.39.108-85.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- эксплуатация ВСКП соответствует требованиям ГОСТ 20.39.108-85;
- при разработке ВСКП учтены эргономические требования в части удобства обслуживания, управления и организации рабочих мест при ремонте;
- обеспечено выполнение норм и требований к социально-психологическим факторам, обеспечивающим сохранение здоровья и работоспособности личного состава.

#### **4.16 Проверка соответствия требованиям по эксплуатации, удобству технического обслуживания, ремонта и хранения**

Проверку соответствия требованиям к удобству технического обслуживания и ремонту провести рассмотрением руководств по эксплуатации на ВСКП и расчета комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей на полноту и достаточность.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- в руководствах по эксплуатации изложены указания по порядку эксплуатации ВСКП, проведения технического обслуживания, определен объем и периодичность технического обслуживания, трудоемкость, необходимые материалы и инструменты;
- состав комплекта запасных частей, инструментов и принадлежностей обеспечивает выполнение текущего ремонта в процессе эксплуатации силами личного состава.

#### **4.17 Проверка соответствия требованиям по электропитанию**

Проверку соответствия требованиям по электропитанию провести согласно соответствующим методикам, приведенным в ЭД.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если при аварийном отключении от сети или отклонении параметров сети за нормы, приведенные в ГОСТ Р 58874-2020, не происходит отказ ВСКП, кроме их отключения.

#### **4.18 Проверка соответствия требованиям по безопасности**

Проверку выполнения требования по безопасности (защитного заземления) провести путем визуального осмотра.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- болты защитного заземления составных частей ВСКП не имеют лакокрасочного покрытия;
- около болтов защитного заземления составных частей нанесен знак заземления по ГОСТ 25874.

#### **4.19 Проверка соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды**

Проверку соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды при работе с ВСКП провести путем рассмотрения сертификатов соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды на ВСКП и ее составные части.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если на ВСКП имеются сертификаты соответствия требованиям охраны труда и защиты окружающей среды действующих российских стандартов.

#### 4.20 Проверка соответствия требованиям по унификации и стандартизации

Проверку соответствия требованиям унификации и стандартизации провести рассмотрением «Заключения об уровне унификации и стандартизации» ВСКП в части применения стандартных и унифицированных материалов, компонентов, узлов и деталей.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если применяются унифицированные и стандартные материалы, компоненты, узлы и детали.

#### 4.21 Проверка соответствия требованиям по технологичности

Проверку соответствия требованиям по технологичности ВСКП провести рассмотрением «Заключения по результатам экспертизы по технологичности» ВСКП в части обеспечения возможности последующего серийного производства на специализированном российском предприятии.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если в «Заключении по результатам экспертизы на соответствие требованиям по технологичности» присутствует обоснование обеспечения возможности применения прогрессивных технологических процессов производства, автоматизации и механизации, обеспечения серийного производства, технологичности сборки в соответствии с требованиями применения прогрессивных технологий с учетом требований ГОСТ 14.201-83.

#### 4.22 Проверка соответствия требованиям к метрологическому обеспечению

Проверку соответствия требованиям к метрологическому обеспечению провести путем рассмотрения заключения по результатам проведения метрологической экспертизы ВСКП на соответствие требованиям действующих российских стандартов.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если в заключении по результатам проведения метрологической экспертизы подтверждено соответствие ВСКП требованиям действующих российских стандартов и указано, что все датчики из состава имеют сертификаты и свидетельства о поверке.

#### 4.23 Проверка соответствия требованиям к сырью, материалам и КИМП

Проверку соответствия требованиям к сырью, материалам и КИМП провести путем проверки даты выпуска комплектующих элементов и материалов по маркировке и данным, указанным в ЭД.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если она и ее СЧ обеспечивают следующее: покупные изделия и материалы имеют израсходованный срок хранения не более 1/3 установленного на них техническими условиями полного срока сохраняемости, применяемые материалы и покупные изделия, на которые срок сохраняемости не установлен, применены со сроком хранения с момента выпуска не более двух лет.

#### 4.24 Проверка соответствия требованиям по консервации, упаковке и маркировке

Проверку соответствия требованиям по консервации, упаковке и маркировке провести путем рассмотрения КД и ЭД на ВСКП на соответствие требованиям ГОСТ 15150-69, категория «Ж2». Состояние маркировки оценивается в ходе испытаний.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если:

- в КД обозначены содержание и места маркировки ВСКП и упаковки;
- надписи соответствуют требованиям ГОСТ 23090-78 и ОСТ 107.460024.001-90;
- маркировка нанесена на несъемных частях ВСКП, доступных для обзора;
- маркировка устойчива в течение всего срока службы ВСКП, механически прочная;
- обозначения электрических соединителей позволяют определить сопрягаемые части соединителей;
- обозначения нанесены непосредственно на корпуса сопрягаемых частей соединителей или на кабели и панели терминалов около частей соединителей;
- электрорадиоизделия на плате обозначены в соответствии с обозначениями на принципиальной электрической схеме;
- в КД и ЭД предусмотрены меры внешней противокоррозионной защиты, указаны условия хранения в соответствии с ГОСТ 15150-69, срок хранения ВСКП,
- а также срок хранения без переконсервации, требования к упаковке для обеспечения транспортирования всеми видами транспорта в средних условиях, установленных ГОСТ 15150-69;
- упаковка разработана в соответствии с требованиями ГОСТ 23216-78;
- упаковка ВСКП защищает от:

- а) проникновения атмосферных осадков,
- б) проникновения пыли.

Перед упаковкой ВСКП и ее комплектующие должны быть подвергнуты временной противокоррозионной защите, вариант защиты ВЗ-10 с применением силикагеля КСМГ в необходимом количестве.

#### 4.25 Проверка соответствия специальным требованиям

Проверку соответствия специальным требованиям провести путем рассмотрения КД и ЭД на ВСКП на соответствие требованиям наличия имитаторов и/или технологических приспособлений, позволяющих провести испытания ВСКП в составе средств автономного судовождения.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если имеется комплект имитаторов и/или технологических приспособлений, позволяющих провести испытания ВСКП в составе средств автономного судовождения. Имитаторы и/или технологические приспособления аттестованы для проведения испытаний установленным порядком.

#### 4.26 Проверка соответствия требованиям по транспортабельности

Проверку соответствия требованиям по транспортабельности провести путем рассмотрения ЭД на ВСКП.

ВСКП считается выдержавшей проверку, если в ЭД допускается транспортировка ВСКП в таре завода-изготовителя всеми видами транспорта, имеющими грузовое пространство соответствующего объема, предельная дальность и скорость не устанавливаются.