На правах рукописи

ЛЕОНОВ

Станислав Олегович

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЯВЛЕНИЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность)

ДИССЕРТАЦИОННАЯ РАБОТА

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: Доктор технических наук Носов Виктор Николаевич

Москва 2015

Список сокращений

- ГДВ гидродинамическое возмущение;
- ГДИ гидродинамический источник;
- ПСА приводный слой атмосферы;
- ПСМС приповерхностный слой морской среды;
- ВВ внутренняя волна;
- АЦП аналого-цифровой преобразователь;
- ПИ приемник излучения.

СОДЕРЖАНИЕ

| ВВЕДЕНИЕ5 |
|--|
| ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСВИЙ ГДИ НА ПАРАМЕТРЫ МОРСКОЙ |
| СРЕДЫ, МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ, АЛГОРИТМОВ |
| ОБРАБОТКИ И МЕТОДОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ |
| ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ 10 |
| 1.1. Воздействие внутренней волны на параметры морской |
| поверхности12 |
| 1.2. Воздействие внутренней волны на параметры приводного слоя |
| атмосферы16 |
| 1.3. Воздействие внутренней волны на параметры приповерхностного |
| слоя морской среды22 |
| 1.4 Анализ существующих методов дистанционного обнаружения |
| проявлений гидродинамических источников |
| 1.4.1 Анализ оптических методов регистрации параметров морской |
| поверхности |
| 1.2. Анализ оптических методов регистрации параметров |
| приповерхностного слоя морской среды |
| 1.3. Анализ оптических методов регистрации параметров приводного |
| слоя атмосферы47 |
| 1.4. Анализ методов комплексирования и разработка идеологии |
| системного подхода к комплексированию методов регистрации |
| проявлений ГДВ55 |
| 4. Выводы к главе |
| ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И |
| МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ РЕГИСТРИРУЕМОЙ |
| ИНФОРМАЦИИ 64 |
| 2.1. Разработка алгоритма предварительной обработки информации при |
| регистрации параметров морской поверхности |

| 2.2. Разработка алгоритма предварительной обработки информации при |
|---|
| регистрации параметров приповерхностного слоя морской среды |
| 2.3. Разработка алгоритма предварительной обработки информации при |
| регистрации параметров приводного слоя атмосферы |
| 2.4. Математическая модель комплексирования обработки данных 101 |
| 2.5. Методика выявления структуры аномалий комплексного сигнала106 |
| Выводы к главе109 |
| ГЛАВА 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСНОГО |
| ПОДХОДА В НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ |
| ИССЛЕДОВАНИЯХ110 |
| 3.1. Предварительные испытания и калибровки разработанного комплекса |
| дистанционной оптической аппаратуры110 |
| 3.1.1. Лабораторные испытания макета сканирующего лазерного локатора111 |
| 3.1.2. Лабораторные испытания макета двухканального фотометра |
| яркости моря119 |
| 3.1.3. Лабораторные испытания макета аэрозольного лидара123 |
| 3.2. Методика проведения комплексных экспериментальных |
| исследований возможностей повышения эффективности |
| регистрации ГДВ126 |
| 3.3. Натурные комплексные исследования эффективности регистрации |
| ГДИ в разных метеоусловиях132 |
| Выводы к главе147 |
| ВЫВОДЫ148 |
| ЛИТЕРАТУРА150 |

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время все больший интерес как в России, так и за рубежом вызывают вопросы регистрации источников морских гидродинамических возмущений (ГДВ). Вследствие чего особое внимание уделяется вопросам систем разработки перспективных дистанционного обнаружения гидродинамических (ГДИ) источников естественного, как так И искусственного происхождения по вызываемым ими возмущениям морской среды. К числу естественных источников относятся внутренние волны, течения, вихревые структуры и т.д. В качестве искусственных источников могут выступать различного характера неровности дна, опорные конструкции платформ, которые при обтекании их течениями образуют гидродинамические возмущения, канализационные стоки и т.д. В основе источников гидродинамических механизмов регистрации лежит представление о морской среде как тракте передачи информации о подводных явлениях, что позволяет осуществлять их регистрацию, даже когда они происходят на больших глубинах.

Регистрация подводных гидродинамических источников ПО ИХ проявлениям может осуществляться с помощью различных дистанционных методов, среди которых важное место занимают методы дистанционной оптической регистрации. Отличием оптических методов OT радиолокационных или контактных методов является то, что они позволяют регистрировать не только изменение параметров на морской поверхности, но и параметров приповерхностного слоя моря и приводного слоя атмосферы, вызываемых воздействием ГДИ. Гидродинамические возмущения от ГДИ могут вызывать изменения таких параметров перечисленных сред как спектр морского волнения, концентрация приповерхностной биомассы И концентрация аэрозоля соответственно [1-3].

Если в качестве источника ГДИ рассматривать внутреннюю волну, то она вызывает смещение масс воды. Достигая приповерхностного слоя, эти возмущения, в свою очередь, вызывают перераспределение концентрации

содержащихся в морской среде фитопланктона и взвесей [2, 3], кроме того они приводят к возникновению приповерхностных течений, которые обусловливают изменение спектра морского волнения [4]. И, наконец, движения масс воды из глубины к поверхности воздействуют на растворенные в воде пузырьки газа, которые, проникая через морскую поверхность, вызывают изменение концентрации морского аэрозоля в приповерхностном слое атмосферы [5-7].

Применительно к задаче регистрации названных аномалий оптические методы обладают наибольшей чувствительностью. В отличие ОТ радиодиапазона, оптическое излучение достаточно глубоко проникает в приповерхностный слой океана, а малая длина волны, сравнимая с размерами взвеси, позволяет осуществлять регистрацию eë параметров В приповерхностном слое моря. Малая длина волны оптического излучения обеспечивает нерезонансный характер отражения также OT морской поверхности, что позволяет достигать одинаково высокой чувствительности дистанционных оптических методов при регистрации параметров морского волнения независимо от пространственного спектра волн, в котором произошли изменения вызванные ГДИ. Что касается регистрации аномалий в приповерхностном слое атмосферы, то здесь сравнимость длины оптического излучения с размерами частиц морского аэрозоля также обеспечивает высокую чувствительность оптических методов.

Основной недостаток оптических методов заключается в том, что их эффективность зависит от метеоусловий. Необходимо отметить, что информационные сигналы, регистрируемые оптическими методами, подвержены различному влиянию метеорологических и гидрологических условий в каждой среде, где осуществляется регистрация проявлений ГДИ. Так, например, эффективность методов, предназначенных для регистрации проявлений ГДИ на морской поверхности в условиях штиля или сильного шторма, существенно снизиться. Методы регистрации проявлений ГДИ в

приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы в условиях штиля, наоборот, будут работать с максимальной эффективностью.

Таким образом, актуальной задачей является комплексирование методов и обработки отдельных оптических методов информации, получаемой помощью, с повышения эффективности С ИХ целью дистанционной регистрации проявлений ГДИ при существенных изменениях метеоусловий.

Применение комплексного подхода позволит, с одной стороны, решить задачу выбора оптимальных методов регистрации ГДИ, что приведет к увеличению чувствительности регистрации изменений параметров в каждой отдельной среде, а с другой стороны, за счет совместной обработки регистрируемых сигналов повысить эффективность обнаружения и определения присутствия искомых ГДИ, тем самым снизить их зависимость от гидрометеорологических факторов.

В этой связи <u>целью диссертационной работы</u> является разработка метода комплексного использования дистанционных оптических средств регистрации проявлений ГДИ и разработка программно-аппаратного комплекса для исследования возможностей повышения эффективности регистрации ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводом слое атмосферы в различных метеоусловиях.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие научно-технические задачи:

 провести анализ дистанционных оптических методов регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы;

– осуществить выбор оптимальных дистанционных оптических методов для регистрации проявлений ГДВ;

разработать судовые макеты дистанционной оптической аппаратуры
 для регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности,
 приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы;

– разработать методику комплексирования отдельных дистанционных методов регистрации проявлений ГДВ;

 разработать алгоритм предварительной подготовки сигналов, регистрируемых комплексом оптической аппаратуры с учетом особенности сигналов каждого канала регистрации;

 разработать алгоритм комплексирования регистрируемой информации, поступающей с каждого канала комплекса оптической аппаратуры;

 создать программные модули обработки регистрируемой информации, реализующие разработанные алгоритмы предварительной подготовки сигналов и их последующей комплексной обработки;

 разработать программу и методики предварительных лабораторных и последующих натурных испытаний разработанных макетов дистанционной оптической аппаратуры и программ обработки информации;

 провести предварительные натурные экспериментальные исследования возможностей созданного макета комплексной оптической аппаратуры для регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы;

 провести натурные бортовые экспериментальные исследования комплексной регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы в различных метеоусловиях.

Структура и объем работы.

Диссертация содержит введение, три главы и выводы.

В первой главе проведен анализ проявлений гидродинамических источников на параметры морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приводного слоя атмосферы и литературы по вопросу применения оптических методов регистрации параметров морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приводного слоя Ha атмосферы. проведенного осуществлен выбор основе анализа

оптимальных методов для регистрации проявлений ГДВ и рассмотрены возможные алгоритмы обработки сигналов, регистрируемых при использовании выбранных методов. Также в первой главе проведен анализ существующих методов комплексирования информации и возможностей их использования для решения поставленной в настоящей работе задачи эффективности ГДВ повышения регистрации В различных гидрометеоусловиях.

Во второй главе выполнена разработка схемотехнического исполнения макетов дистанционной оптической аппаратуры на основе выбранных предварительной методов И алгоритмов подготовки исходных информационных сигналов С целью выделения ИХ информативных признаков.

В третьей главе представлены результаты проведенного натурного эксперимента по регистрации проявлений ГДВ в трех средах при различных Ha метеоусловиях. первом этапе экспериментальных исследований проводились лабораторные испытания созданного макета комплексной которых были калибровки аппаратуры, В рамках проведены И предварительные натурные эксперименты регистрации искусственно ГДВ. определялись возможности созданных где созданных макетов аппаратуры фиксировать изменения параметров регистрируемых сред. На втором этапе были проведены бортовые комплексные экспериментальные исследования регистрации ГДВ, создаваемых движущимся надводным судном, в различных метеоусловиях.

В заключении сформулированы основные результаты проведенного диссертационного исследования.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСВИЙ ГДИ НА ПАРАМЕТРЫ МОРСКОЙ СРЕДЫ, МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ, АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ И МЕТОДОВ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Гидродинамические процессы, протекающие В морской среде, представляют большой интерес для изучения, поскольку оказывают влияние гидрохимические характеристики океана, его термодинамические, на химические и биологические свойства. Также гидродинамика может влиять на различные искусственные сооружения, находящиеся в океане. Любой процесс или явление, имеющий место в открытом океане, формирует гидродинамическое поле, зарегистрировав которое можно изучать само явление. Наличие информации о гидродинамических явлениях является необходимой для решения задач поиска и обнаружения различных объектов источников ГДВ, разработка мероприятий по совершенствованию скрытности, а также вопросы определения состояния океана.

Источниками гидродинамических возмущений могут быть различные объекты как естественного, так и искусственного происхождения [8,9]. К естественным относятся движение источникам неровности дна, тектонических плит, а в качестве искусственных источников могут выступать опоры различных сооружений, движущиеся подводные объекты, корабли. Согласно последним исследованиям и наблюдениям гидродинамические возмущения ИХ формирования отрываются ОТ источника после И распространяются далее BO всех направлениях под воздействием Образование гравитационного поля Земли [10]. гидродинамических возмущений объясняется сопротивлением трения, связанным с вязкостью воды, и колебаниями поверхности самого источника. Частицы воды, соприкасающиеся с поверхностью искусственного источника-объекта, как бы прилипают к нему и движутся вместе с ним. Силы сцепления частиц воды друг с другом меньше, чем с твердым телом, поэтому каждый следующий слой воды отстает по скорости от первого, что приводит к постепенному их

сползанию и образованию внутреннего колебания слоя воды. Сама по себе задача регистрации ГДИ непосредственно в морской толще является достаточно сложной для осуществления, а в некоторых случаях – невозможной. Именно поэтому актуальными являются вопросы создания систем косвенной дистанционной регистрации источников ГДВ.

В основе подхода к созданию косвенных систем регистрации лежит представление о морской среде, как тракте передачи информации, в результате чего предметом исследования и регистрации становится не гидродинамический источник, а возмущения, которые он вызывает в морской среде в виде внутренних волн, вихревых образований, приповерхностных течений. Такие ГДВ меняют параметры МП, ПСМС и ПСА, зарегистрировав которые можно говорить о вызвавшем их гидродинамическом источнике. Регистрация изменения параметров морской поверхности и приводных слоев может осуществляться с помощью различных дистанционных методов, среди которых важное место занимают оптические методы. Как отмечалось ранее, важной особенностью оптических методов является то, что они позволяют регистрировать изменения всех трех сред, что позволяет получить больше информации о ГДИ по сравнению с другими методами.

Если в качестве ГДВ рассматривать внутреннюю волну, ΤО, распространяясь, она вызывает смещение масс воды. Достигая приповерхностного слоя, эти возмущения, в свою очередь, приводят к течений, обусловливают возникновению приповерхностных которые изменение параметров морского волнения [4].

Внутренняя волна может образовываться не только если гидродинамический источник расположен в толще морской среды, она также может образовываться и от движущегося по поверхности объекта, за счет «dead water» эффекта [11].

В свою очередь, на параметры сред, в которых осуществляется регистрация влияют гидро-метеорологические факторы, что создает дополнительные помехи и снижает эффективность методов косвенной

регистрации. Для примера рассмотрим влияния внешних факторов на параметры морской поверхности (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Источники, влияющие на параметры морской поверхности

Теперь рассмотрим как влияют ГДВ на параметры морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приводного слоя атмосферы.

1.1. Воздействие внутренней волны на параметры морской поверхности

Механизмы взаимодействие внутренних волн с поверхностными рассматриваются в работах [12-16]. Существующие математические модели взаимодействия ВВ с морской поверхностью можно разделить на три основных группы по соотношению параметров внутренних и поверхностных волн. В качестве примера рассмотрим случай взаимодействия между внутренней волной и поверхностной (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Схема морской среды с распространяющейся внутренней волной

Будем рассматривать случай для следующих соотношений между параметрами волн:

• большая длина волны/маленькая амплитуда взаимодействия

$$\frac{h}{\lambda} = \varepsilon, \frac{a}{h} = \varepsilon^2,$$

где *h* – глубина слоя распространения внутренней волны;

а – амплитуда волн на границе раздела;

є – масштабный коэффициент;

- λ длина волны на границе раздела.
 - поверхностные волны небольшой амплитуды

$$\frac{a_1}{h_1} = \varepsilon_1, \, \varepsilon_1 = \varepsilon^{2+\alpha}, \, \alpha > 0, \tag{1.1}$$

где h_1 – глубина слоя верхней жидкости;

*а*₁ – амплитуда волн на поверхности.

Волновые поля для внутренней и поверхностной волн при условии, что внутренняя волна имеет большой период и маленькую амплитуду, можно записать в виде:

$$X = \varepsilon x, \ \xi(x,t) = \varepsilon^2 \xi(X,t), \ \eta(x,t) = \varepsilon \eta(X,t)$$

Поверхностные волны в этом случае будет квази-монохроматическими, удовлетворяющими условию (1.1).

$$\eta_{1}(x,t) = \frac{\varepsilon_{1}}{\sqrt{2}} \omega^{+}(D)^{\frac{1}{2}} (V(X,t)e^{ik_{0}x} + \kappa.c.) + \varepsilon_{1}^{2}\eta_{1}(X,t)$$

$$\xi_{1}(x,t) = \frac{\varepsilon_{1}}{\sqrt{2}i} \omega^{+}(D)^{-\frac{1}{2}} (V(X,t)e^{ik_{0}x} - \kappa.c.) + \varepsilon_{1}^{2}\xi_{1}(X,t)$$

где V(X,t) – функция описывающая огибающую поверхностных мод; ξ_1 и η_1 - средние значения поля для данных поверхностных мод/

На основе полученных связей между внутренней волной и поверхностными, можно провести моделирование воздействия BB на поверхностные волны, так для следующих параметров $\rho_1/\rho = 0.997$, $h_1/h = 0.266$ и $\varepsilon^2 \sim a/h = 0.069$ можно получить графики зависимости амплитуды поверхностной и внутренней волн (рис. 1.3):



Рисунок 1.3 – Амплитуды поверхностной и внутренней волн (для наглядности поверхностные волны приведены в увеличенном масштабе)
Для параметров океана возле побережья Орегона *ρ*₁/*ρ* = 0.998, *h*₁/*h* = 0.035 и *ε*² ~ *a*/*h* = 0.192 [17] можно получить следующий график (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Амплитуды поверхностной и внутренней волн (для наглядности поверхностные волны приведены в увеличенном масштабе)

Таким образом, схематическое представление воздействия ГДИ на параметры морской поверхности можно представить на схеме (рис. 1.5).



обусловленных прохождением внутренней волны

В результате рассмотрения механизма воздействия ВВ в качестве гидродинамического источника на параметры морской поверхности видно, что существуют локальные изменения параметров волнения, в области где присутствует ГДИ, а именно пространственного периода и амплитуды поверхностных волн.

1.2. Воздействие внутренней волны на параметры приводного слоя атмосферы

Движения масс воды из глубины к поверхности воздействуют на растворенные в воде пузырьки газа, которые, проникая через морскую поверхность, вызывают изменение концентрации морского аэрозоля в приповерхностном слое атмосферы [18-20].

Частицы аэрозоля в приводном слое атмосферы обычно разделяют на четыре группы в соответствии с их размерами:

- молекулярный аэрозоль ($D_u < 0,02$ мкм);
- частицы Эйткена ($D_{4} = 0,02$ мкм 0,1 мкм);
- аккумулированный аэрозоль ($D_u = 0, 1 0, 6$ мкм);
- крупный аэрозоль (D_ч > 0,6 мкм).

Образование приводного аэрозоля может осуществляться за счет различных физических процессов, среди которых можно выделить два наиболее значимых по процентному соотношению аэрозоля:

- Образование аэрозоля за счет его сдувания ветром с гребней волн (рис. 1.6).
- 2. Взаимодействие растворенных пузырьков газа с поверхностью (рис. 1.7).



Рисунок 1.6 – Схема процесса сдувания аэрозоля с гребней поверхностных

волн



Рисунок 1.7 – Схема образования приводного аэрозоля за счет процесса разрыва пузырьков газа

Существуют три различных вида пузырьков в океане, которые различающихся источниками образования (атмосферные, донные и кавитационные). Донными источниками называют разломы и трещины в океане из которых просачивается газ. Типичными газами для таких источников являются метан и углекислый газ. Кавитационные источники образуются в результате человеческой деятельности, типичный пример – винт двигателя корабля. Пузырьки, образованные за счет кавитационных и донных источников, являются случайными в верхнем слое океана.

Если не учитывать вклад от процесса обрушения волн в приводный аэрозоль, то можно записать следующее соотношение [21]:

$$N \propto r^{-4} \exp\left(-\frac{z}{L}\right),$$

где *N* – концентрация частиц;

r – радиус частиц;

z – расстояние от поверхности моря;

L – глубина.

Как было указано ранее, одним ИЗ физических возмущений, создаваемым любым ГДИ, является внутренняя волна. Такая волна может воздействовать на концентрацию растворенных пузырьков газа в приводном слое атмосферы, направление и скорость их движения [22]. Исследования влияния ВВ на параметры растворенных пузырьков газа в приповерхностном слое морской среды были проведены в работах [23-24]. В работе [25] была возможности косвенной регистрации высказана идея 0 различных гидродинамических возмущений за счет измерения концентрации пузырьков в приповерхностном слое морской среды.

Рассмотрим влияние внутренней волны на структуру пузырькового слоя и, соответственно, концентрацию приповерхностного аэрозоля. Для этого, согласно работам [26-28] будем использовать двухпараметрическую модель (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Схема воздействия ВВ на пузырьковый слой

Для описания временного и пространственного распределения концентрации пузырьков в жидкости будем основываться на работе [29], где используется следующая модель.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Nu) + \frac{\partial}{\partial z} (Nv) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_v \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_v \frac{\partial N}{\partial z} \right) - \sigma_* N + q(x, z, t),$$
(1.2)

где *N* – концентрация пузырьков,

 K_v – коэффициент турбулентной диффузии;

 σ_* - скорость растворения пузырьков;

q(x,z,t) – источник пузырьков из атмосферы;

и – горизонтальная скорость пузырьков;

v – вертикальная скорость пузырьков.

Исходя из предположения, что горизонтальная и вертикальная скорости пузырьков связаны с воздействием внутренней волны, то для уравнения (1.2) было найдено решение [29]. Для случая L = 400 м, H = 20 м, длины внутренней волны $\lambda = 200$ м и амплитуды 3 м, расположения термоклина на глубине h = 10 м можно получить зависимость распределения скорости звука в приповерхностном слое, концентрацию пузырьков, распределение по размерам пузырьков (рис. 1.9 - 1.11).



Рисунок 1.9 – Распределение скорости звука в приповерхностном слое (м/с)



Рисунок 1.10 – Концентрация пузырьков в приповерхностном слое (1/м³)



Рисунок 1.11 – Распределение по размерам пузырьков в приповерхностном слое (мкм)

Как можем видеть, в результате воздействия ВВ происходит изменение скоростей движения и концентрации пузырьков газа, растворенного в воде, причем рост концентрации наблюдается вблизи поверхности, что приводит к увеличению количества лопнувших пузырьков и, соответственно, изменению концентрации приводного аэрозоля. Возможность регистрации внутренних волн по рассеянию излучения на пузырьковых образованиях экспериментально была показана в [30].

1.3. Воздействие внутренней волны на параметры приповерхностного слоя морской среды

Микромасштабные турбулентности, вызванные гидродинамическими источниками, могут приводить к изменению концентрации фитопланктона в приповерхностном слое моря [31, 32]. Такие эффекты как погружение, движение по морской поверхности или в толще морской среды различных объектов увеличивают приповерхностные течения, которые взаимодействуя с фитопланктоном, вызывают изменение его концентрации [33, 34]. Воздействие внутренних волн приводит к вертикальному движению водной толщи, особенно сильно это проявляется в области пикноклина. Поскольку частицы фитопланктона имеют нейтральную плавучесть, то они под воздействием движущейся массы воды могут быть значительно смещены по вертикали. Так как интенсивность излучения с увеличением глубины уменьшается экспоненциально, то воздействие внутренней волны на частички фитопланктона приведет к расположению их в области с наибольшей средней интенсивностью излучения. Как следствие, можно ожидать, что внутренние волны имеют основное влияние на изменение концентрации фитопланктона в приповерхностном слое морской среды.

Взаимодействие гидродинамических возмущений различных масштабов с фитопланктоном можно подразделить на несколько групп (рис. 1.12) [35].



Рисунок 1.12 – Масштабы взаимодействий и взаимосвязь между биологическими и физическими процессами, имеющими отношение к экологии фитопланктона. Синие (обозначение А) представляют собой

физические процессы, которые влияют на динамику планктона или распределений. Красные (обозначение В) представляют собой способы, которыми биология планктона влияет на физику океана. А1 – эффект влияния турбулентности на рост планктона. А2 - турбулентность и скорость

взаимодействия планктона. АЗ - влияние донных слоев на динамику

планктона и его распределений. А4 - тонкие слои планктон. А5 -Горизонтальная неоднородность планктона, индуцированная внутренними волнами. А6 - взаимодействие планктона с прибрежными течениями. А7 – влияние фронтов на мезомасштабную пятнистость планктона. В1 – влияние вязкости морской воды на фитопланктон. В2 - микромасштабные изменения

планктона, генерируемые движением жидкости. В3 – процессы перемешивания планктона. В4 - крупномасштабные биологические эффекты на физику океана.

Степень влияния гидродинамических возмущений на фитопланктон зависит от отношения его размера к масштабной длине Колмогорова η (обычно несколько мм или меньше для турбулентных сред), которая определяется согласно выражению:

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{1/4},$$

где *v* – кинематическая вязкость жидкости;

є – степень диссипации кинетической энергии турбулентности [36].

Так как влияние ГДВ на фитопланктон меньших размеров отличается от влияния на крупный фитопланктон, то эффект увеличения концентрации вследствие ГДВ будет зависеть В OT размеров организмов. экспериментальных исследованиях было показано, что в условиях ГДВ организмы, размером около 60 мкм, поднимаются к поверхности ближе, чем организмы больших размеров [34]. Существенное влияние оказывает величина турбулентности на динамику фитопланктона, также было установлено, что важен не только размер самих организмов, но и их форма физиология и состояние окружающей среды [37]. Механизм взаимодействия фитопланктона и ГДВ является достаточно сложным, который можно представить в виде схемы (рис. 1.13).



Рисунок 1.13 – Схема взаимодействия фитопланктона и ГДВ

Методы и соответствующие масштабы изменения фитопланктона на которых осуществляется регистрация его параметров представлены на рисунке 1.14.



Рисунок 1.14 – Схема методов для изучения фитопланктона и масштабов его

изменения

В работах [38, 39] была предложена математическая модель, которая описывает воздействие внутренней волны на фитопланктон. Модель позволяет определить изменение степени фотосинтеза при воздействии ВВ на основе взаимосвязи интенсивности излучения с морской поверхности, коэффициента поглощения излучения фитопланктоном и глубины расположения фитопланктона.

Интенсивность излучения с морской поверхности при наличии внутренней волны на глубине z может быть определена следующей зависимостью.

$$E(z) = E_0 \exp(-kz),$$

где E_0 – интенсивность излучения с поверхности моря,

 $k = k_d$ – диффузный коэффициент поглощения.

В качестве исходных данных используем измеренное значение интенсивности излучения с морской поверхности за время осреднения 5 мин. (рис. 1.15а); далее модель строиться по времени с интервалом 5 мин. Изменение концентрации фитопланктона по глубине аппроксимируем синусоидой (рис. 1.15б). Рассмотрим случай стационарной внутренней волны и с амплитудами 0,5 и 1 м. Диффузный коэффициент поглощения примем постоянным $k_d = 0,74$. Рассчитанное значение интенсивности излучения с морской поверхности E(z) используем для расчета величины фотосинтеза [40], но при условии, что граничное условие для PP(z) = 0 для значений *мкм моль* M^2

падающей интенсивности излучения меньше 1 $\frac{MKM MOЛb M^2}{C}$

$$PP(z) = B\alpha E(z) - \left(\frac{\alpha E(z)^2}{4P_{\text{max}}}\right),$$

при
$$E(z) \ge 1 \frac{MKM MOЛЬ M^2}{c}$$
,

где PP(z) – величина фотосинтеза на глубине z; B – концентрация биомассы (например *Chl a*); P_{max} – величина насыщенного фотосинтеза; α – наклон зависимости фотосинтеза он освещенность на глубине *z*.



Рисунок 1.15 – Исходные зависимости для моделирования воздействия внутренней волны на интенсивность излучения с поверхности моря Результаты моделирования освещенности и величины фотосинтеза под воздействием внутренней волны приведены на рисунке 1.16.



Рисунок 1.16 – Результаты моделирования зависимости интенсивности излучения с поверхности моря при воздействии внутренней волны (три кривых рассчитаны для различных амплитуд воздействия BB на фитопланктон)

Данная модель учитывает только изменение, вызванное в результате воздействия ВВ. Изменения параметров фотосинтеза или концентрации фитопланктона под действием других внешних факторов не учитываются. В реальных условиях изменению будут подвержены различные параметры фитопланктона, пробные эксперименты были проведены в работе [40], где было показано, что при воздействии внутренней волны происходит изменение степени фотосинтеза, а соответственно и интенсивности излучения с поверхности (рис. 1.17).



Рисунок 1.17 – Зависимость степени фотосинтеза при воздействии внутренних волн различной интенсивности.

Интенсивность воздействия ВВ отложено по оси ординат в относительных единицах. Наличию ВВ соответствует степень воздействия более 1. Из графика видно, что при воздействии внутренней волны происходит увеличение в фотосинтезе и наоборот.

1.4 Анализ существующих методов дистанционного обнаружения проявлений гидродинамических источников

1.4.1 Анализ оптических методов регистрации параметров морской поверхности

Изучение поверхности параметров морской с использованием оптических методов проводится уже в течение нескольких десятилетий [41-44]. За это время разработано большое количество различных методов дистанционного измерения параметров морской поверхности, которые можно разделить на две большие группы по принципу их работы: активные и пассивные [45]. Активные системы включают в свой состав источник излучения и строятся они по лидарным схемам. Активные системы, в свою очередь, можно подразделить на два большие подгруппы: методы глубинного зондирования и методы поверхностного зондирования. В методах глубинного зондирования проводится анализ лазерного излучения,

рассеянного в толще морской среды, а в методах поверхностного зондирования анализируется излучение, отраженное от взволнованной морской поверхности. Методы поверхностного зондирования позволяют получать информацию о процессах, происходящих в толще морской среды, по их проявлениям на морской поверхности. Методы глубинного лазерного зондирования основываются на таких процессах, как рэлеевское рассеяние, комбинационное рассеяние (Раман-эффект), рассеяние Ми, резонансное рассеяние рассеяние, флуоресценция, вынужденное Мандельштама-Бриллюэна (ВМБР) и др. Эти методы также позволяют регистрировать процессы происходящие в морской толще, но эффективность такой регистрации снижается по мере увеличения глубины на которой происходят ГДВ.

Методы поверхностного лазерного зондирования в большинстве своем основываются на измерениях временной задержки, формы и длительности отраженных импульсов, а также разности фаз между опорными и отраженными от морской поверхности сигналами [46]. Определение статистических характеристик зарегистрированных сигналов, позволяет выявить воздействие гидродинамических возмущений на параметры поверхностного волнения.

Исследование характеристик морской поверхности проводилось в работах [47-52], где показана техническая реализация оптических методов в вариантах. В нескольких зависимости от используемых принципов регистрации и способов оптического зондирования их условно можно классифицировать следующим образом: непрерывное сканирование морской поверхности узким лазерным лучом (активное лазерное сканирование); морской поверхности узким импульсная локация лазерным ЛУЧОМ (импульсное лазерное зондирование); регистрация изменений картины солнечных бликов морской поверхности (пассивный метод).

Далее кратко рассмотрены основные технические реализации каждого отдельного класса методов с целью определения наиболее подходящего для дистанционной регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности.

изображений Регистрация морской поверхности В оптическом диапазоне является самым распространенным методом получения информации о параметрах волн. По таким изображением можно судить об энергетическом спектре морского волнения [53], а также определять характерные углы наклона волн. При лазерном зондировании происходит отражение лазерного излучения от морской поверхности, в результате чего образуется зеркальный блик, причем расходимость отраженного пучка определенным образом связана с кривизной морской поверхности в зоне отражения. Таким образом, параметры отраженного излучения зависят от состояния морской поверхности. Регистрируя отраженный сигнал от поверхности, можно судить о параметрах волн. Такие характеристики оптического излучения как спектральный состав, высокая степень когерентности, малая угловая расходимость и длина волны, величина которой много меньше линейных размеров поверхностных волн, позволяют осуществлять регистрацию отдельных зеркальных бликов, обусловленных, в основном, отражением оптического излучения короткими капиллярными поверхностными волнами. Яркость зеркального блика зависит от кривизны водной поверхности, а расстояние между зеркальными бликами в плоскости морской поверхности отражает пространственную структуру волнения. Доплеровское смещение частоты отраженного излучения от морской информацию поверхности несет 0 скоростях движения отдельных бликов. Такие зеркальных возможности оптического излучения, применительно к исследованию поверхностных волн самого широкого диапазона, обусловлены нерезонансным характером рассеяния света поверхностью [54, 55].

К методам поверхностного зондирования можно отнести метод, позволяющий определять такую важную характеристику морского волнения

как распределение числа зеркальных точек по модулям скоростей [56, 57], что, в свою очередь, позволяют определить изменение скорости движения морской поверхности в зависимости от различных факторов.

Аэрофотосъёмка является одним из наиболее традиционных методов исследования морской поверхности. Она нашла широкое применение при изучении поверхностного волнения, течений, различного рода аномалий морской поверхности при воздействии внутренних волн, циркуляционных движений [58]. Изображения морской поверхности, полученные при выполнении аэрофотосъёмки, могут быть использованы для визуального дешифрирования аномальных участков, документирования фактов загрязнения, сравнения результатов измерений, полученных другими датчиками дистанционного зондирования, а также для тематической обработки, проводимой наземной c целью определения различных параметров исследуемых явлений.

С помощью фотоаппаратуры можно производить съёмку как в широком диапазоне спектра оптического излучения 0,5-0,8 мкм, так и одновременно в нескольких, сравнительно узких, диапазонах электромагнитного спектра (многозональную съемку). В зависимости от спектральной чувствительности матричного приемника излучения можно проводить регистрацию изображений как в видимом диапазоне, так и в ближнем ИК диапазоне оптического излучения. Телевизионная аппаратура работает в тех же спектральных диапазонах электромагнитного излучения, что и фотоаппаратура. Недостатком телевизионной аппаратуры является относительно малое пространственное разрешение.

Телевизионный метод исследования морской поверхности позволяет измерить распределение волн по длинам и направлениям распространения. Сущность метода заключается в том, что видеосигнал от анализируемого участка водной поверхности преобразуется в контурный вид и измеряется количество отрезков, контуров заданной длины и направления. Прибор, реализующий данный метод, состоит из телевизионной камеры, блока

предварительной обработки видеосигнала, осуществляющего пространственную фильтрацию, блока выделения связных контуров заданного направления и счетчика. С помощью данного метода измерены параметры морского волнения (длина и направление волн) при воздействии ГДИ. Данный метод пригоден как для работы с аэрофотоснимками, так и для исследования изображений в реальном масштабе времени [58].

Сканирующие устройства по сравнению с фотоаппаратурой имеют ряд преимуществ. В то время как спектральный диапазон фотосъёмок ограничен видимым И ближним ИК-диапазоном, сканерная съёмка может производиться в широком диапазоне спектра солнечного излучения от ультрафиолетового до теплового инфракрасного (0,3-14 мкм) [59]. При многозональном сканировании регистрируется излучение, отражённое и морской средой, одновременно во многих спектральных рассеянное К достоинствам этих приборов можно отнести диапазонах. также оперативность получения и доставки информации потребителям, а к недостаткам более низкое, ПО сравнению С фотоаппаратурой, пространственное разрешение и относительную сложность.

Метод сканирования основан на активном зондировании узким лазерным пучком морской поверхности с борта носителя регистрирующей аппаратуры. В состав регистрирующей аппаратуры (лазерного локатора) входят два канала: лазерный излучающий канал и приемный оптикоэлектронный канал с системой вторичной обработки информации.

Современное развитие техники дает возможность создавать устройства авиационного базирования для исследования различных морского волнения. Возможность работы с авиационного параметров носителя позволяет заметно повысить производительность методов, так как размеры просматриваемого пространства возрастают с увеличением высоты. Известны различные схемы и конструктивные решения авиационных устройств параметров Далее для регистрации морского волнения.

рассмотрены некоторые из них для выяснения основных подходов к созданию подобных устройств.

В работе [60] рассмотрено самолетное устройство для измерения морского волнения по зеркальным бликам, предназначенное для работы с высоты 300 метров над уровнем моря. Параметры этого устройства позволяют получать размер лазерного пятна на поверхности моря около 4 см. В качестве источника излучения применялся He-Ne лазер, работающий на длине волны 0,632 мкм. Схема данного устройства приведена на рисунке 1.18.





В данном приборе реализована совмещенная схема канала подсвета и приема отраженного лазерного излучения, т.е. совмещены оптические оси каналов. Это обеспечивает удобство получения и обработки бликовых сигналов от морской поверхности. Однако при большой мощности лазерного излучателя могут возникать помехи в приемном канале, связанные с рассеянием фонового излучения.

Авиационные устройства могут строиться и по разделенной схеме [61]. Схема локатора с разделенными каналами подсвета и приема лазерного излучения представлена на рисунке 1.19.



Рисунок 1.19 – Схема лазерного локатора с разделенными каналами

Разделенная схема построения локатора позволяет использовать более мощный излучатель. Такая схема широко используется при построении импульсных систем регистрации параметров морской поверхности. Её недостатком является сложность обеспечения пространственного сопряжения области подсвета и приема на морской поверхности, особенно при наличии сканирования.

Проведенный анализ литературы позволяет сделать вывод, что регистрация бликовой структуры на взволнованной водной поверхности узким световым пучком является наиболее подходящим способом для решения поставленной задачи регистрации наиболее изменчивой коротковолновой части спектра морского волнения под воздействием ГДИ. При зондирующем луче, поперечный размер которого меньше пространственного масштаба искомого мелкомасштабного волнения, могут регистрироваться такие параметры морского волнения, как вероятностные кривизны поверхности, расстояний распределения радиуса между зеркальными бликами, а при сканировании зондируемой поверхности под углами и уклонов морской поверхности. Кроме того, при разными сканировании светового пучка по различным азимутальным направлениям

можно получать азимутальные зависимости указанных параметров. При этом пространственное разрешение данного метода определяется размером луча на зондируемой поверхности, который является легко регулируемым, а минимальное значение регистрируемого радиуса кривизны – мощностью зондирующего излучения.

В качестве первичной обработки информации могут применяться следующие методы (рис. 1.20) для выделения информативных признаков о параметрах морского волнения и их изменениях. Все методы обработки информации можно разделить на две группы: спектральные методы, основанные на получении и последующей обработке спектров исходного сигнала (фурье-спектров или вейвлет-спектров) и статистические методы, основанные на получении статистических распределений информативных признаков и параметров выходного сигнала устройства регистрации.

Выходной сигнал устройства для выбранного оптического метода регистрации параметров морской поверхности будет иметь ВИД последовательности коротких импульсов разделенных по времени. Сигналы такого типа не являются оптимальными для спектральной обработки, но при этом, удобны для статистической обработки, поэтому в данной работе для обработки информации со сканирующего лазерного локатора будут использованы статистические методы.


Рисунок 1.20 – Структура методов первичной обработки информационных

сигналов сканирующего лазерного локатора

На основе проведенного анализа возможных методов регистрации параметров морского волнения, как уже было сказано выше, выбран метод сканирования морской поверхности узким лазерным лучом. Данный метод прошел экспериментальную апробацию по регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности и был исследован в работе [46]. Для обработки сигналов далее будут использованы статистические методы, а именно алгоритмы построения распределений информационных параметров сигналов [62]. Такая обработка позволит свести сложный импульсный сигнал локатора к набору параметров, характеризующих изменение характеристик среды.

1.2. Анализ оптических методов регистрации параметров приповерхностного слоя морской среды

Взаимодействие дневного света, проникающего в толщу вод, с растворенными И взвешенными В ней веществами обусловливает «собственный» цвет моря. Основными факторами, формирующими цвет вод морей, являются фитопланктон, неорганическая взвесь и растворенный органический материал. Причем изменение цвета, в основном, связано с изменением концентрации или циклом жизнедеятельности фитопланктона. Основным показателем процесса жизнедеятельности фитопланктона является одна из его составляющих - хлорофилл «а», существенно влияющий на спектральную яркость поверхностного слоя океана вследствие селективного поглошения солнечного света.

В качестве параметра, характеризующего цвет моря, широкое распространение получил индекс цвета водной толщи – отношение восходящего из моря излучения на двух длинах волн, которые обычно выбирают с учетом высокого и низкого поглощения хлорофилла «а» [63].

За последние годы было проведено множество исследований направленных на изучение параметров и динамики фитопланктона, а также разработаны различные оптические методы измерения концентрации фитопланктона и создано большое количество приборов. Все разработанные методы применялись, в основном, для исследования состояния самого хлорофилла, а не его изменения при воздействии ГДИ. Как было отмечено ранее, ГДВ приводят к изменению концентрации приповерхностного фитопланктона, что приводит к изменению индекса цвета моря.

Проведем анализ существующих методов и устройств регистрации изменений концентрации фитопланктона в приповерхностном слое морской среды при воздействии ГДВ, с целью выбора оптимального. При выборе метода будем учитывать особенности поставленной задачи, а именно – метод должен обеспечивать регистрацию изменения параметров приповерхностного слоя моря с подвижного носителя аппаратуры и

эффективно выделять изменения концентрации фитопланктона, которые вызванные наличием ГДВ. Один из основных критериев выбора - особенность регистрации, позволяющая фиксировать относительное изменение сигналов в разных точках пространства, вызванное изменением концентрации фитопланктона под воздействием ГДИ.

Метод, который будет регистрировать оптическое излучение, восходящее от морской поверхности на двух длинах волн описан в работе [64]. Структурная схема макета 2-х лучевого дифференциального фотометра яркости моря с одним фотоприемником приведена на рисунке 1.21.



Рисунок 1.21 – Структурная схема измерителя индекса цвета: а – ФЭУ – фотоумножитель, ЛД – логарифмирующий диод, ИП – истоковый повторитель,

СД – синхронный детектор, ФД – фотодиод, УОС – усилитель опорного сигнала, ЭД – электродвигатель.

Разделение излучения с различными длинами волн в приборе производится с помощью специального модулятора, состоящего из двух светофильтров с длинами волн максимального пропускания $\lambda = 450$ нм и поглощения фитопланктона $\lambda = 550$ нм. Светофильтры выполнены в виде установлены в общую полудисков И круглую оправу. Модулятор размещается перед фотоприемником И вращается co скоростью, обеспечивающей неизменность измеряемого параметра (яркости моря) за время сравнения. При этом, на катод фотоумножителя падают попеременно световые потоки зеленого и синего цвета. Таким образом, фотометр регистрирует только отношение яркости света в двух выбранных спектральных участках - индекс цвета моря:

$$I_{\mathcal{U}} = L_M(550) / L_M(450)$$

В устройствах такого типа необходимо иметь высокую линейность градуировочной кривой фотодетектора, для устранения влияния абсолютных значений яркости моря на величину отношения сигналов. Выполненные в надир через вертикальную шахту измерения цвета моря показали, что наличие облаков практически не оказывают влияния на измеряемую величину. Недостатком данного метода являются небольшие изменения сигнала в момент закрытия Солнца отдельным облаком при остальном равномерном фоне неба.

Существуют методы измерения индекса цвета, позволяющие индекса цвета [65]. осуществлять нормировку измеренных значений Функциональная прибора, схема реализующего такую методику, представлена на рисунок 1.22.



Рисунок 1.22 – Функциональная схема дифференциального измерителя коэффициента спектральной яркости поверхности моря

 (1 – фотоумножитель; 2 – оптический узел сведения лучей; 3 – интерференционные светофильтры; 4 – оптический узел переключения светофильтров; 5 – диск
 светофильтров; 6 – молочная пластина опорного канала; 7 – входные объективы; 8 – оптический узел системы синхронизации; 9 – диск оптико-механического коммутатора; 10 – волоконные световоды; 11 – фиксаторы положения диска светофильтров)

Коэффициент спектральной яркости поверхности моря $\rho(\lambda)$, определяется как отношения яркости моря в надир $L_M(\lambda)$ к яркости горизонтальной изотропной полностью отражающей поверхности $L_O(\lambda)$:

$$\rho(\lambda) = \frac{L_M(\lambda)}{L_O(\lambda)}$$

Величина яркости моря $L_M(\lambda)$, измеряемая экспериментально, складывается из двух составляющих: яркости излучения солнца и неба, рассеянных в приповерхностном слое воды $L_T(\lambda)$, и френелевского отражения излучения неба $L_H(\lambda)$ от поверхности воды:

$$L_{M}(\lambda) = L_{T}(\lambda) + rL_{H}(\lambda),$$

где *r* – френелевский коэффициент отражения от поверхности моря.

Информация о содержании фитопланктона в приповерхностном слое моря находится в $L_T(\lambda)$. Если длина волны λ попадает в полосу поглощения фитопланктона, то с увеличением концентрации фитопланктона, снижается величина яркости моря $L_T(\lambda)$. Прибор регистрирует два различных потока излучения: один - от неба, а другой - от морской поверхности. Такой прибор может регистрировать входное излучение не только на двух отдельных длинах волн, а на 8-ми и более различных длинах волн оптического излучения, в зависимости от типа установленного в барабане фильтра. Недостатком является относительная сложность исполнения прибора, поскольку необходимо иметь два приемника излучения, согласованных по чувствительности И при большом количестве фильтров сильно увеличиваются габариты прибора.

В работе [66] представлен спектрофотометр, измеряющий коэффициент яркости моря $\rho(\lambda) = \frac{L_T(\lambda)}{L_O(\lambda)}$. В этом приборе длина волны регистрируемого излучения перестраивается с помощью монохроматора на

основе дифракционной решетки, Данный прибор измеряет индекс цвета моря:

$$I_{II} = \rho(550) / \rho(440),$$

где $\rho(550)$ и $\rho(440)$ – коэффициенты яркости моря на длинах волн 550 и 440 нм соответственно.

Оптико-механическая схема прибора изображена на рисунке 1.23 В оптической опрашивающей системе применены иллюминаторы (1 и 6), служащие коллектором канала облученности. Угол поля зрения приемника ($2W = 9^{\circ}$) образуется диафрагмами (2,5,14) и входной щелью монохроматора (7). В каналах яркости неба и облученности установлены нейтральные светофильтры (3 и 15), ослабляющие световой поток на два и один порядок соответственно. Поворотное зеркало (16) направляет световой поток канала облученности на опрашивающее зеркало (4). Излучения через световод (12) и с канала яркости моря поступают на зеркало (4) без ослабления. Входная щель (7), вогнутое зеркало-коллиматор (9), дифракционная решетка на вогнутой подложке (8) и выходная щель (10) образуют Z - образную схему Водсворда монохроматора. Фотоумножитель (11)установлен непосредственно за выходной щелью монохроматора.



Рисунок 1.23 – Оптико-механическая схема измерителя коэффициента

яркости моря

(1,6 – кварцевые иллюминаторы; 2,5,14 – диафрагмы; 3,15 – нейтральные светофильтры; 7
– входная щель монохроматора; 8 – дифракционная решетка; 9 – зеркало-коллиматор; 10
– выходная щель монохроматора; 11 – фотоприемное устройство; 12 – световод; 13 – молочное стекло; 4 и 16 – вращающиеся и поворотное зеркала)

На основе рассмотренных методов и приборов для измерения яркости моря (или коэффициента спектральной яркости моря) можно сделать вывод, что содержание фитопланктона в приповерхностном слое воды хорошо коррелирует с величиной индекса цвета моря I = $\rho(540)$ / $\rho(440)$. Эта величина практически эквивалентна отношению яркостей толщи моря $L_{T}(540)$ на длинах волн 540 и 440 нм соответственно. Причем эта $V_{L_{T}}(440)$ может быть дистанционно измерена достаточно величина простым прибором, регистрирующим яркости моря со спектральным разделением каналов.

Для регистрации ГДВ по их проявлениям в приповерхностном слое моря на основе проведенного анализа выбран метод, регистрирующий изменения индекса цвета моря. В основе измерения индекса цвета моря лежит метод измерения яркостей морской толщи на двух длинах волн, который в литературе получил название метод двухканальной фотометрии [67]. Возможности регистрации ГДВ этим методом были подтверждены в работе [68], где регистрировалось распределение индекса цвета моря по глубине. При проведении экспериментов авторы зарегистрировали локальное изменение индекса цвета моря по отношению к фоновому состоянию, которое, как утверждают авторы, может быть вызвано распадом внутренней волны. Данный метод имеет высокое пространственное разрешение, что позволяет получать большой объем информационных данных.

Информация, полученная посредством устройства, построенного на основе выбранного метода, может обрабатываться различными способами (рис. 1.24). Поскольку основная задача данной работы - регистрация изменений концентрации фитопланктона и растворенного органического то способами обработки регистрируемой оптимальными вещества, информации являются частотные методы, позволяющие выявить изменение в частоте вариаций концентрации фитопланктона, которая связана С воздействием ГДВ.



Рисунок 1.24 – Способы обработки информационных сигналов, полученных

при измерении яркости морской толщи

На основе проведенного анализа методов регистрации изменения концентрации фитопланктона в приповерхностном слое морской среды был выбран метод двухканальной фотометрии. Этот метод имеет высокую чувствительность к изменениям концентрации фитопланктона, вызванных воздействием ГДВ, а также простое схемотехническое исполнение, что делает его оптимальным для решения поставленных задач.

1.3. Анализ оптических методов регистрации параметров приводного слоя атмосферы

Хорошо известно, что обрушение поверхностных волн образует пузырьки воздуха в приповерхностном слое моря. Для ветра, скорость которого превышает 6,5 – 7 м/с, существует непрерывный пузырьковый слой переменной толщины, который может доходить до глубины нескольких метров. Этот слой структурирован в пространстве и во времени и сильно зависит от скорости ветра [69, 70]. При воздействии ГДИ происходит движение пузырьков воздуха к поверхности, где они лопаются, образовывая дополнительные частички аэрозоля [71, 72].

Рассматриваемые оптико-электронные приборы для регистрации параметров аэрозолей относятся к классу активных измерительных систем, состоящих из источника оптического излучения, схемы выделения и ограничения участка (объема) приводной атмосферы и фотоприемного устройства, регистрирующего изменение параметров излучения после прохождения среды или рассеяния на ней. При распространении оптического излучения через изучаемую среду изменение его параметров может проявляться в амплитуде, фазе и поляризации, а также в появлении дополнительных флуктуаций. В данной работе объектом изучения являются частички аэрозолей, находящиеся в приводном слое атмосферы.

Оптические устройства, в основе работы которых лежит измерение рассеянного частицами аэрозоля излучения, можно классифицировать с помощью обобщенной измерительной схемы (рис. 1.25)



Рисунок 1.25 – Обобщенная измерительная схема регистрации аэрозолей

Исследуемая зона аэрозоля освещается узким лазерным пучком излучения, который может быть как монохроматичным, так и содержать набор спектральных линий (частотная решетка). В некоторых случаях используется достаточно широкий сплошной спектр И частот (суперконтинуум). Излучение быть может как поляризованным В определенной плоскости, так и неполяризованным.

К настоящему времени имеется большое число исследовательских работ, посвященных изучению характеристик аэрозолей, в том числе над поверхностью моря. Целью таких работ являлось изучение распределения аэрозольных частиц по размерам, а также определение их концентрации в различных атмосферных образованиях – облаках, тумане и т.д. Хорошо известна оптико-локационная модель аэрозоля континентального происхождения [73]. Для аэрозолей над морской поверхностью вполне допустима та же оптико-локационная модель, но с измененными средними значениями параметров аэрозолей. Однако, исследованиям механизмов образования приводного аэрозоля, особенно в условиях открытого океана, небольшое работ [74-76]. Можно посвящено относительно число

предположить, что средние размеры аэрозолей морского происхождения будут больше средних размеров континентального аэрозоля из-за наличия насыщенных паров воды над морской поверхностью. Что касается воздействия на характеристики приводного аэрозоля различных процессов, протекающих в толще океана, то работ, связанных с изучением влияния гидродинамических воздействий на параметры приводного аэрозоля, крайне мало.

В изучении морского аэрозоля важную роль играют лидарные методы [77-79]. Такие методы позволяют проводить быстрые измерения концентрации аэрозоля и его распределения по размерам одновременно в различных гидрометеорологических условиях. Также они нашли широкое применение при изучении состояния аэрозоля вблизи берега, где приливные волны образуют пену, которая состоит из большого числа воздушных пузырьков.

Анализ известных схем лазерного зондирования выявил три наиболее pacпространённых варианта: коаксиальную (рис. 1.26 а), параксиальную (рис 1.26 б) и бистатическую (рис 1.26 в) [80]. Схемы коаксиального и параксиального расположения являются оптимальными для регистрации рассеянного излучения на значительных дистанциях, т.к. это позволяет разместить передающий и приемный канал на едином основании, что упрощает управление, согласование и синхронизацию их работы.



Рисунок 1.26 – Схемы лазерного зондирования рассеянного излучения: акоаксиальная, б- параксиальная, в- бистатическая. 1- лазер, 2 – приемная система

Для решения каждой конкретной задачи измерения параметров аэрозолей используется конкретная схема лидара. Однако во всех случаях в лидаре непременно присутствуют три основных блока: 1) лазерный источник излучения; 2) приемный объектив с фотодетектором; 3) регистратор лидарных сигналов. Для многих задач требуется селектировать собранный приемным объективом лидарный сигнал по спектральным частотам или по поляризации. В этих случаях на выходе устанавливают анализаторы спектра или поляризации. Кроме того, регистрация таких быстропротекающих процессов, к которым относится лидарный сигнал, невозможна без быстродействующих Таким использования процессоров. образом, обобщенную схему лидара можно представить состоящей из пяти основных блоков (рисунок 1.27).



Рисунок 1.27 – Обобщенная схема лидара

Существуют стационарные и передвижные лидраные системы [80]. На лидарной рисунке 1.28 показана блок-схема передвижной системы, предназначенной для мониторинга атмосферы. Система включает Nd:YAG лазер, который может работать на первой, второй и третьей гармониках с выходной энергией 250, 100 и 50 мДж соответственно. Генерируемые импульсы имеют длительность 7нс и частоту следования 10 Гц. Такая лидарная система позволяет регистрировать концентрацию аэрозольных образований и распределение частиц по размерам. Поворачивая зеркало вокруг двух осей, появляется возможность регистрации профилей концентрации и размеров аэрозоля на разных высотах. Дальность действия такой системы составляет до 2 KМ, пространственное разрешение определяется длительностью зондирующего импульса и составляет 2 м.



Рисунок 1.28 – Блок-схема передвижной лидарной системы

Существуют самолетные лидары, предназначенные для исследования тропосферных газов и аэрозолей. На рисунке 1.28 приведен общий вид и схема такого самолетного лидара, основанного на методе дифференциального поглощения. В рассматриваемой системе для накачки двух лазеров на красителях используются два Nd:YAG лазера с удвоением частоты.



Рисунок 1.28 – Общий вид и схема самолетного лидара

В работах [77, 78] описаны исследования изменения концентрации приводного аэрозоля вблизи морского берега в зависимости от глубины места, проведенные с помощью мобильной лазерной установки, размещенной на автомобиле. В качестве источника излучения использовался импульсный эксимерный лазер с энергией 70 мДж и перестраиваемой длиной волны в пределах 320 – 670 нм. Такие параметры лазерного источника позволяют получать данные об изменении параметров светорассеяния от морского аэрозоля на дистанции до 1,5 км и на высотах от 5 до 100 м. В указанной выше работе [78] высказано предположение о том, что параметры аэрозоля зависят не только от глубины моря в данном прибрежном районе, но и от динамических процессов, происходящих в морской толще – течений, внутренних волн и т.д.

Исходя из вышесказанного, для проведения регистрации изменения параметров приводного аэрозоля при воздействии ГДВ оптимальным методом является энергетический, основанный на геометрическом рассеянии оптического излучения на частицах аэрозолей [81, 82]. Данный метод позволяет получать информацию об изменении концентрации аэрозоля и прошел апробацию в полунатурных условиях [83].

Информация, полученная посредством устройства, построенного на основе выбранного метода, может обрабатываться различными способами (рис. 1.29). Так как в данной работе основной задачей является регистрация изменений концентрации аэрозоля в приводном слое атмосферы, то оптимальными способами обработки являются статистические методы, позволяющие выявить изменение распределения амплитуд регистрируемого сигнала.



Рисунок 1.29 – Способы обработки информационных сигналов полученных

методом измерения изменения концентрации приводного аэрозоля

На основе проведенного анализа методов регистрации изменения концентрации аэрозоля в приповерхностном слое морской среды выбран способ на основе упругого рассеяния лазерного излучения на аэрозолях. Выбранный метод имеет высокую чувствительность к изменениям концентрации аэрозоля, вызванных воздействием ГДВ, а также простое схемотехническое исполнение, что делает его оптимальным для решения поставленной задачи.

1.4. Анализ методов комплексирования и разработка идеологии системного подхода к комплексированию методов регистрации проявлений ГДВ

На сегодняшний день системный подход широко применяется в науке и технике, т.е. в областях, где чрезвычайно важно проводить измерения с высокой степенью точности и достоверности. Задача системного подхода тесно связана с комплексированием измерителей, методов и информации в одну единую информационную систему. Для решения поставленной в данной работе задачи повышения эффективности регистрации ГДВ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводом слое атмосферы задачи необходимо провести анализ существующих методов комплексирования различных измерителей.

Широкое применение комплексные системы нашли в основном в решении задач навигации и управления подвижными объектами, где информация о координатах и параметрах движения измеряется с помощью различных типов датчиков. Одной из наиболее ранних комплексных систем является гиромагнитный компас, в котором объединены два различных измерителя, что позволяет повысить общую точность измерения курса самолёта.

Основная задача, решаемая комплексными системами навигации и управления, состоит в совместном использовании отдельных устройств для целей повышения точности полученной информации. Смысл комплексирования [84] состоит в том, чтобы оптимальным образом использовать информацию об одних и тех же физических величинах или явлениях, полученную посредством использования различных датчиков. Необходимым условием повышения эффективности и точности измерений при взаимном объединении (комплексировании) отдельных устройств является различие В спектральных характеристиках ошибок ЭТИХ измерителей. Применительно к поставленной в работе задаче различие

информации измерителей обусловлено не одинаковым влиянием одних и тех же метеоусловий на каждый канал комплексной системы.

Теория комплексирования берет свое начало с теории инвариантности, которая зародилась на основе идеи, высказанной Г.В. Щипановым. В дальнейшем основные положения данной теории сформулированы и систематизированы в работе А.И. Кухтенко [85]. В теории комплексирования известны два основных способа объединения измерителей – схема компенсации и схема фильтрации [86,87].

Схема компенсации [88] очень удобна для выявления физической который можно получить сущности выигрыша, В результате измерителей. Принцип работы комплексирования ДВУХ комплексной системы, построенной по схеме компенсации, заключается в следующем: сигналы первого и второго измерителей (рисунок 1.30) $x_1 = x + \varphi_1$ и $x_2 = x + \varphi_2$, содержащие измеряемую величину x и помехи φ_1 и φ_2 , поступают на вычитающее устройство, в результате чего выходной сигнал с вычитающего устройства равен разности $\varphi_1 - \varphi_2$. Если спектры помех расположены в различных частотных областях, то при условии выбора оптимального фильтра F так, чтобы он с минимальными искажениями пропускал помеху φ_1 и возможно полнее подавлял помеху φ_2 , то на его выходе останется помеха φ_1 . Если ее далее вычесть из сигнала x_1 , то полученный на выходе результат будет очень близок к требуемому значению х измеряемого параметра.



Рисунок 1.30 – Схема компенсации

Вторая схема (схема фильтрации) обладает симметрией в обработке поступающей информации и все измерители в ней как бы «равноправны». Схема фильтрации для *n* каналов приведена на рисунке 1.31.



Рисунок 1.31 – Схема фильтрации

Результаты измерений *n* сигналов, содержащих измеряемую величину *x*, и ошибки (помехи) после прохождения *n* фильтров F_1 , F_2 и F_n суммируются. В результате выходной сигнал имеет вид:

$$y = \left[\sum_{i=1}^{n} F_{i}\right] \cdot x(t) + \sum_{i=1}^{n} F_{i} \cdot \varphi_{i}(t)$$

Алгоритм фильтрации по физической трактовке аналогичен алгоритму компенсации, но при этом информация об измеряемом параметре во всем диапазоне спектра формируется за счет комбинирования отдельных информационных элементов с соответствующего канала измерения, для которого спектр помехи в данном диапазоне имеет наименьшую плотность.

В гидрофизических исследованиях наиболее перспективно применение комплексных систем для косвенного измерения проявлений ГДИ. Благодаря различным физическим принципам, положенным в основу измерителей, ошибки которых имеют разную зависимость от конкретных метеоусловий, существует возможность синтезировать систему, работающую в различных метеоусловиях без снижения эффективности регистрации явления. Соответственно самым подходящим методом комплексирования является метод фильтрации. Но необходимо, что на данном этапе исследований изучение влияния гидрометеорологических факторов на эффективность измерений отдельными каналами не проводилась в силу сложности организации экспериментов такого масштаба. Поэтому основной задачей комплексного алгоритма является не только комплексирование отдельных измерителей в систему, но и формирование оптимальных фильтров для каждого канала исходя из метеоусловий, что представляет собой задачу управления.

Обобщенную схему комплексирования различных устройств измерений параметров одного физического явления на основе метода фильтрации можно представить в виде (рис. 1.32).



Рисунок 1.32 – Схема комплексирования трех различных методов измерения Данная схема представляет собой обобщенный алгоритм дистанционных комплексирования различных оптических методов регистрации проявлений ГДВ от гидродинамических источников. Как можем видеть ИЗ рисунка 1.32, информация S_M, S_S, S_A OT одного ГДВ. распространяясь по трем информационным трактам, складывается с различными помехами N_A, N_M, N_S и фоновыми составляющими B_A, B_M, B_S , которые отличаются для каждого канала и могут быть отфильтрованы специальными фильтрами Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 и согласующим фильтром $C\Phi$. В результате применения комплексного подхода к регистрации формируется обобщенная оценочная функция S_{A+M+S} , посредством сложения, которая в последствие анализируется с целью выявления ГДВ

В работах [89, 90] по объединению гидрофизических измерений проводилось комплексирование данных от нескольких одинаковых датчиков,

гидрофизический процесс. Принцип которые регистрировали комплексирования заключался в расположении одних и тех же датчиков в разных местах по отношению к исследуемой области, что обеспечивало различное влияние внешних факторов на измеряемые величины. Далее осуществлялся подбор оптимальных фильтров для получения максимально точной параметра, оценки исследуемого измеренного контактными датчиками.

В нашем случае, как отмечалось выше, применяются три прибора, которые регистрируют изменения параметров в трех различных средах, вызванных ГДИ. Структурная схема комплексного подхода представлена на рисунке 1.33.



Рисунок 1.33 – Структурная схема комплексной обработки.

Согласно представленной схеме (рис. 1.33) первичные сигналы с трех различный приборов, обозначенных буквами (В – приводный слой атмосферы, П – морская поверхность, Т – приповерхностный слой моря) подвергаются первичной обработке с целью унификации и нормировки информационных данных. Для каждого прибора используется собственный метод обработки сигнала, который позволяет выделить группы информативных данных, характерных для каждого конкретного метода

регистрации проявлений ГДВ. Соответственно первичная обработка требуется для подготовки исходной информации, необходимой для дальнейшего проведения комплексной обработки. Весь процесс комплексной обработки может быть представлен в следующем виде:

1. Первичная обработка сигналов приборов комплекса осуществляется по методике, представленной ниже:

- 1.1.Оцифровка первичных сигналов локатора и их запись в буфер временного хранения для получения текущего одномерного массива оцифрованного сигнала $A_0(j)$, где $j = (t_j t_0)f_d$, t_0 время начала записи, $t_0 \le t_j \le t_{\text{max}}$ время получения текущего отсчета оцифрованного сигнала, t_{max} время окончания записи, f_d частота дискретизации сигнала при оцифровке;
- 1.2.Первичная обработка оцифрованных сигналов (фильтрация с целью уменьшения шумов, удаление паразитных трендов, фильтрация периодических паразитных наводок) и формирование массива обработанного оцифрованного сигнала A₁(j);

После первичной обработки сигнала следующий этап обработки проводится индивидуально для каждого метода в соответствии с его особенностями.

2. Вторичная обработка сигналов комплекса.

2.1. Разбиение массива обработанного оцифрованного сигнала на элементарные ячейки для определения их статистических характеристик $\{B_k(j_k) = A_1(j)|_{j=j_{k-1}^{\max}+j_k}, j_k = 1 \le j_k \le j_k^{\max}\}, j_k$ - текущий индекс массива элементарной ячейки, j_k^{\max} - число элементов в массиве элементарной ячейки. 2.2. Определение вектора признаков аномальности для сигналов комплекса: 2.2.1. Лазерный локатор

- Вычисление статистических характеристик элементарных ячеек;
- Формирование массивов статистических характеристик ячеек по траектории движения носителя.

В качестве статистических характеристик могут использоваться различные параметры сигнала. В работе предлагается использовать следующие сигнальные параметры: распределение числа значений амплитуды зеркальных бликов информационного сигнала, попадающих в заданные распределение расстояний интервалы амплитуд; между зеркальными бликами, попадающих в выбранные интервалы расстояний; распределение углов наклона оптической оси локатора при которых получен зеркальный блик, попадающих в заданные интервалы углов (рис. 1.34).



Рисунок 1.34 – Распределения информативных параметров сигнала лазерного сканирующего локатора

(а - распределение числа значений амплитуды зеркальных бликов информационного сигнала, б - распределение расстояний между зеркальными бликами, в - распределение углов наклона оптической оси локатора при которых получен зеркальный блик)

2.2.2. Фотометр яркости моря

- Синхронное накопление полезного сигнала по каналам фотометра;
- Определение поэлементного отношения массивов накопленных значений каналов;
- Выделение высокочастотной составляющей сигнала отношения;
- Спектральная обработка высокочастотной составляющей;
- Формирование массивов статистических характеристик ячеек по траектории движения носителя.

Для оценки параметров приповерхностного слоя в качестве статистических характеристик используются следующие сигнальные параметры: распределение числа периодов перехода через ноль, попадающих в заданные интервалы; распределение числа переходов через ноль, попадающих в заданных временной интервал (рис. 1.35).



Рисунок 1.35 – Распределения информативных параметров сигнала двухканального фотометра

(а - распределение числа периодов перехода через ноль, б - распределение числа переходов через ноль)

2.2.3. Аэрозольный лидар

- Синхронное накопление сигнала по элементарной ячейке;
- Формирование массивов статистических характеристик ячеек по траектории движения носителя.

В качестве статистических характеристик в рамках комплексного подхода предлагается рассчитывать распределения интенсивности рассеянного излучения, т.е. распределения амплитуды сигнала, попадающих В выбранные интервалы Для амплитуд. расширения статистики информационных параметров можно вычислять распределения количества частиц заданного размера, попадающих в интервал заданного размера.

2.3. Масштабирование, нормировка полученных кривых и формирование массива вектора признаков аномальности.

2.4. Формирование массива топологических коэффициентов аномальности, с использованием весовых коэффициентов приборов комплекса.

 Финишная обработка массива топологических коэффициентов аномальности.

3.1.Определение областей R-связности топологического поля признаков;

- 3.2.Определение на основе областей связности наличие симметрии структуры поля признаков и его топологии;
- 3.3.Определение особенностей и параметров гидродинамического воздействия по топологической структуре поля признаков.

4. Выводы к главе

На основе рассмотрения модели взаимодействия ГДВ (на примере ВВ) со средой, было показано, что они вызывают изменения параметров не только на морской поверхности, но и в приповерхностном слое моря и приводном слое атмосферы. Воздействие ГДВ на параметры каждой среды проявляются различным образом, на морской поверхности происходит изменение параметров волнения, а именно периода и амплитуды волн, что приводит к изменению спектральных характеристик морского волнения. В приводном слое атмосферы происходит изменение параметров аэрозолей – концентрация, распределение по размерам и составу. В приповерхностном слое морской среды происходит изменение параметров фитопланктона – концентрация по глубине, концентрация вдоль поверхности, распределение по размерам организмов. Регистрация изменения всех перечисленных параметров может осуществляться с использованием дистанционных оптических методов.

Был проведен анализ возможных оптических методов регистрации параметров рассматриваемых сред, на основе которого были выбраны оптимальные дистанционные оптические методы и алгоритмы первичной обработки информации.

Анализ существующих алгоритмов комплексирования показал, что наиболее подходящим для комплексирования гидрофизических измерений является метод фильтрации.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСА ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ РЕГИСТРИРУЕМОЙ ИНФОРМАЦИИ

Комплексный алгоритм подразумевает под собой приведение всех трех информационных сигналов к одинаковому набору информационных параметров, относящихся к единому пространству признаков и их совместную обработку.

Каждый из выбранных методов регистрации позволяет получать информацию об изменении параметров соответствующих сред, в которых ведется регистрация проявлений ГДИ. Если отдельные измерители работают независимо, то в каждый момент времени анализируются сигналы того измерительного канала, который в данных условиях измерения обеспечивает наиболее Информационные точный результат. сигналы других измерительных приборов оказываются практически бесполезны или, в лучшем случае, используются для повышения достоверности данных или для устранения неоднозначности результатов. При объединении измерительных каналов соответствующим образом в единую систему с общим индикатором, можно существенно повысить точность и достоверность полученных результатов. Как было сказано ранее, такое объединение измерительных каналов принято называть комплексированием. Именно комплексирование позволяет уменьшить недостатки, свойственные каждому отдельному измерительному каналу, посредством чего удается достичь повышения точности или чувствительности измерений, а также увеличения помехозащищенности, а как следствие снижения влияния метеоусловий на эффективность регистрации.

В данной главе разработаны схемы дистанционных оптических приборов, реализующих выбранные методы регистрации параметров трех сред, а также математические модели алгоритмов предварительной обработки информации для каждого канала комплексной системы с целью приведения исходных сигналов к одному типу параметров, и разработана

математическая модель алгоритма комплексирования. Один из способов приведения сигналов к одному пространству информационных признаков может быть статистический метод обработки, позволяющий перейти от абсолютных изменений параметров сигналов к их статистическим оценкам.

2.1. Разработка алгоритма предварительной обработки информации при регистрации параметров морской поверхности

На основе проведенного анализа различных дистанционных методов для регистрации изменения параметров морского волнения выбран метод сканирования взволнованной морской поверхности узким лазерным пучком. Поверхностное волнение имеет широкий спектр колебаний, поэтому в общем случае можно говорить о длинах волн, лежащих в диапазоне от нескольких миллиметров до десятков и даже сотен метров. Мелкомасштабное волнение относится к малоэнергетической компоненте спектра, вследствие чего оно в большей степени, чем длинноволновое, подвержено изменчивости от различных гидродинамических возмущений.

Для разработки схемотехнической реализации выбранного метода регистрации изменения параметров морской поверхности, при воздействии ГДИ, будем исходить из того, что:

1. анализируется некоторая выборка случайного распределения поверхностного волнения;

2. в пределах малой области реальную водную поверхность можно заменить сферической поверхностью, имеющую эквивалентный радиус кривизны;

3. в некоторой ограниченной области может быть применена изотропная модель поверхностного волнения.

Для проведения экспериментальных исследований был разработан макет сканирующего лазерного локатора морского волнения, оптическая схема которого представлена на рисунке 2.1.

Как отмечалось ранее, если учитывать случайный характер формы морской поверхности, то регистрацию и предварительную обработку информации об изменении параметров поверхностного волнения необходимо проводить в виде статистических оценок. Данное обстоятельство требует выполнения большого числа измерений для набора достоверной статистики.



Рисунок 2.1 – Схема разработанного лазерного локатора (ФОС – формирующая оптическая система, ЭД – электродвигатель, РЕД – редуктор, ФПУ – фотоприемное устройство, ДС – датчик синхронизации, СС – система синхронизации)

На схеме (рис. 2.1) представлены два канала макета локатора: канал подсветки и приемный канал. Канал подсветки предназначен для создания и формирования узкого коллимированного лазерного пучка, направленного на водную поверхность. На рисунке он схематично представлен следующими компонентами: лазером, формирующей оптической системой (ФОС) и двумя прямоугольными призмами.

В качестве излучателя в данной схеме локатора используется работающий полупроводниковый лазер, В непрерывном режиме И генерирующий монохроматическое излучение на длине волны 0.65 мкм. Диаметр пучка на выходе лазера составляет 2 мм. Формирующая оптическая система построена ПО схеме телескопической системы Галилея И предназначена для уменьшения угла расходимости лазерного пучка. На ее выходе коллимированный пучок имеет диаметр 4 мм и расходимость 1 мрад.

С помощью двух прямоугольных призм лазерный пучок совмещается с оптической осью приемного канала и направляется на водную поверхность.

Приемный канал состоит из объектива и фотоприемного устройства (ФПУ). После отражения от водной поверхности излучение лазерного пучка попадает во входной зрачок объектива и фокусируется им в плоскости изображения. С этой плоскостью совмещено положение фоточувствительной площадки фотоприемника.

Размер зондирующего лазерного пучка на морской поверхности составляет порядка 12 мм. Для получения достаточно большого объема исходной информации в схему макета локатора введено специальное оптикомеханическое сканирующее устройство – сканер. Сканер изменяет пространственное направление лазерного луча по определенному закону сканирования. В данном локаторе сканер выполнен в виде двух зеркал. Одно зеркало неподвижно и предназначено для излома оптической оси, что обеспечивает меньшие габариты лазерного локатора, а второе – колеблется в некоторой плоскости, обеспечивая линейное сканирование лазерным лучом Привод водной поверхности. сканирующего зеркала выполнен OT электродвигателя (ЭД) через редуктор (Ред.). Средняя частота сканирования составляет примерно 19 Гц. Время, за которое зеркало проходит в одну сторону из одного крайнего положения в другое составляет 26 мс. Угловое поле сканирования составляет около $\pm 6.25^{\circ}$, поэтому на дистанции в 8 метров длина, которую проходит пятно при сканировании из одного крайнего положения в другое, составляет около 2 м. такие параметры лазерного локатора обеспечивают скорость сканирования на морской поверхности, которая составляет 77 м/с.

При движении лазерного луча по морской поверхности, лазерное излучение отражается от поверхности воды. Поскольку оптические оси лазерной подсвечивающей системы и приемной системы совпадают, то если в точке отражения нормаль к морской поверхности направлена вдоль оптической оси лазерного локатора, отраженный пучок попадает во входной

зрачок приемной системы, в результате чего регистрируется зеркальный блик. При сканировании поверхности воды возникает случайная бликовая картина, параметры которой определяются характеристиками морского волнения.

Величина отраженного бликового потока излучения, а значит и сигнал фотоприемника, зависят от радиуса кривизны водной поверхности в точке отражения. По амплитуде фотосигнала, используя известные зависимости [3], можно определить средние радиусы кривизны поверхностного волнения в области отражения.

Общая схема первичной обработки сигнала представлена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Схема первичной обработки сигналов сканирующего лазерного локатора

алгоритм первичной обработки информации макета Рассмотрим сканирующего лазерного локатора. Данным макетом осуществляется физической регистрация величины, которая связана С изменением параметров морского волнения. Преобразование физической величины в электрический сигнал осуществляется приемником оптического излучения, работа которого может быть описана следующим выражением.

$$U_{\Pi M}(t) = S_{\Pi M} \cdot \Phi_{\Pi M} = S_{\Pi M} \cdot f(R, t), \qquad (2.1)$$

Приемник излучения осуществляет линейное преобразование физической величины в электрический аналог, последующий анализ

которого должен привести к получению однозначного соответствия с физической величиной.

Сигналы с лазерного сканирующего локатора поступают на входы внешнего модуля АЦП E14-440 L-CARD, который осуществляет первичную оцифровку этих сигналов, а также их хранение во внутреннем буфере – FIFO и выдачу их по мере заполнения буфера в ЭВМ через последовательный порт USB.

Стандартной управляющей программой модуля является его драйвер, который загружается стандартными средствами под управлением системы Windows, после чего модуль готов для программирования из управляющей сервисной программы компьютера. После загрузки системной DLL – библиотеки, поставляемой с программным обеспечением модуля, в распоряжение пользователя представляются более 30 сервисных функций для работы с модулем. Функции написаны на языке C++ в диалекте Borland C++, что позволяет писать на этом языке сервисные программы обработки и управления.

Посредством стандартной управляющей программы осуществляется запись массива исходных данных, в пределах установленного времени (T_{3an}) в оперативной памяти компьютера. Затем полученный массив оцифрованного сигнала являлся исходным массивом для программы первичной обработки. Для выделения необходимой информации из регистрируемого лазерным сканирующим локатором сигнала, необходимо осуществлять запись трех каналов. Схема записываемых сигналов с лазерного сканирующего локатора представлена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Схема записи сигналов макета сканирующего лазерного локатора

Исходным является сигнал, поступающий с фотоприемного устройства. Данный сигнал несет в своих параметрах информацию о морском волнении. Сигнал синхронизации позволяет контролировать положение сканирующего зеркала относительно вертикали по времени. Блокирующий сигнал является системным и снижает межканальные наводки АЦП. В соответствии со спецификой работы управляющей программы L-Graph, записанный оцифрованный массив $X_0(j)$ для обработки будет иметь структуру, представленную на рисунке 2.4.

| Исходный сигнал | | Сигнал | | Блокирующий | | Блокирующий | |
|-----------------|--------|---------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| | | синхронизации | | сигнал | | сигнал | |
| 1 байт | 2 байт | 3 байт | 4 байт | 5 байт | 6 байт | n-1 байт | n байт |

Рисунок 2.4. – Структура элементарной записи данных

По данным результатов моделирования процесса преобразования сигналов, отраженных морской поверхностью, было получено, что выходные сигналы локатора от взволнованной морской поверхности представляют собой отдельные импульсы, обусловленные попаданием отраженного лазерного излучения в приемную оптическую систему лазерного локатора.

Причем, информация о параметрах морского волнения кодируется амплитудами принимаемых импульсов и интервалами времени между ними.

Аналогово-цифровой преобразователь осуществляет процедуру дискретизации по времени и квантованию по уровню. В результате операции дискретизации сигнал становиться определен в дискретные моменты времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i = t_{ouc}$.

Операция дискретизации:

$$X(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} U(t) \cdot \delta(t - t_i) dt,$$

где $\delta(t) = \begin{cases} \infty, ecnu \ t = t_i \\ 0, ecnu \ t \neq t_i \end{cases}$ - дельта функция Дирака [51],
 $\int_{0}^{\infty} \delta(t) dt = 1$

Операция квантования записывается в виде выражения:

$$X_{0}(t_{i}) = \Delta X \cdot ent\left[\frac{|X(t_{i})|}{\Delta X} + \kappa\right] \cdot sign(X(t_{i})),$$

где ent[] - операция взятия целой части, ΔX - шаг квантования,

$$\kappa = \begin{cases} 0, npu \ yceчении \\ 0.5, npu \ округлении \end{cases}$$
$$sign(X) = \begin{cases} 1, ecлu \ X > 0 \\ 0, ecлu \ X = 0 \end{cases}$$
- знаковая функция.
-1, ecлu X < 0

После операции дискретизации и квантования информационный массив можно представить в виде дискретного набора амплитуд, которые определены в отдельные моменты времени и если каждому моменту времени присвоить порядковый номер, то массив амплитуд исходной информации можно представить в виде:

$$X_0(t_i) \equiv X_{0,i}$$
, где $i \in 1...N$

На этапе подготовки сигнала из него необходимо удалить различные гармонические наводки, которые могут появиться вследствие различных помеховых факторов. На этом этапе также устраняются низкочастотные тренды сигнала, обусловленные медленным дрейфом параметров приемной системы прибора и его электронного тракта. Кроме того, устраняются отдельные импульсы малой амплитуды, возникающие за счет приема прибором паразитных зеркальных бликов от внешних световых источников.

 $X_{0,i}, i \in [1...N]$ - исходный цифровой сигнал с лазерного сканирующего локатора, в пределах времени записи t_{rec} , которое определяется:

$$t_{rec} = t_{\max} - t_{\min},$$

где t_{\min} - время начала записи, t_{\max} - время окончания записи.

Учитывая частоту дискретизации f_d АЦП, можно определить количество отсчетов N оцифрованных в буфер за время записи:

$$N = t_{rec} \times f_d = (t_{max} - t_{min}) f_d$$

После АЦП необходимо провести процедуру нормирования для приведения электрического сигнала к измеряемой величине.

$$X_{1,i} = \frac{X_{0,i} \times \Delta X}{S_{MAS}}$$

где ΔX – шаг квантования, S_{MAS} – масштабный коэффициент, позволяющий перейти от электрического сигнала к измеряемой величине.

Для устранения гармонической наводки, а также устранения медленных трендов осуществляется низкочастотная фильтрация (НЧ) сигнала, которая в общем виде может быть записана:

$$f_1(t) = A_{HY} \otimes f(t) = \int_0^t f(\tau) A_{HY}(t-\tau) d\tau,$$

В случае дискретного сигнала интеграл свертки преобразуется в сумму и может быть записан в виде:
$$X_{2,i} = \sum_{h=-\frac{w_2}{2}}^{\frac{w_2}{2}} a_h \cdot X_{1,(i-h-w/2)}, \qquad (2.2)$$

где *a_i* – весовые коэффициенты фильтра.

В процедуре обработки низкочастотная фильтрация реализуется посредством скользящего усреднения с шириной окна усреднения *w*, которая выбирается согласно необходимой частоте среза низкочастотного фильтра (НЧ) фильтра, и затем из исходного сигнала вычитается отфильтрованная составляющая. Подавление гармонической наводки реализуется узкополосной фильтрацией исходного сигнала на частоте наводки и также вычитанием результата из исходного сигнала. Для определения частоты среза низкочастотного фильтра использована следующая зависимость:

$$f_{cut} = \frac{f_d}{W},$$

где f_d – частота дискретизации исходного сигнала.

При изменении ширины окна цифрового фильтра происходит изменение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) фильтра. На рисунке 2.5 представлены АЧХ для цифровых фильтров с различной шириной окна *w*.



Рисунок 2.5 – АЧХ фильтра скользящего усреднения

В общем случае выражение (2.2) для фильтрации одного элемента сигнала будет иметь следующий вид:

$$X_{2,i} = \sum_{h=0}^{w} a_h X_{1,(i+h-w_2)},$$
(2.3)

В случае простой фильтрации все коэффициенты фильтра будут равны 1, тогда выражение (2.3) может быть переписано в виде:

$$X_{2,i} = \frac{1}{w} \sum_{h=-\frac{w_{2}}{2}}^{\frac{w_{2}}{2}} X_{1,(h+i)}$$

После фильтрации проводится обработка процедуры с целью вектора информационных параметров зарегистрированного выделения На первом уровне обработки осуществляется формирование сигнала. распределений (гистограмм) массивов максимумов амплитуд сигнала сканирующего лазерного локатора и времени между максимумами соседних импульсов. Для ускорения процесса используются специальные матричные алгоритмы обработки.

Процесс формирования гистограмм включает в себя следующие этапы:

- после заполнения программного буфера управляющего компьютера производится перенос этого массива в программу первичной обработки сигнала;
- определение по массиву амплитуд исходного сигнала, соответствующего массива экстремумов амплитуд (пороговая фильтрация);
- для массива амплитуд экстремумов сигнала формируются соответствующие гистограммы распределения;
- очистка программного буфера системы обработки с последующем заполнением его данными следующего потока измерений из буфера накопления модуля E14-440;
- формирование в результате цикла описанных выше процедур массивов соответствующих гистограмм за необходимый период наблюдений;
- на финишной стадии обработки по полученным гистограммам определяются их соответствующие статистические параметры (средние значения, центры распределения и т п.);

 для более удобного протоколирования результатов производится формирование отдельных единичных гистограмм в соответствующие массивы, а статистических параметров в соответствующие векторы.

Определение массива экстремумов проводится исходя из заданного порога γ_p , выше которого зарегистрированные сигналы от зеркальных бликов можно считать истинными, а не паразитными от внешних источников. Значение порога задается оператором по результатам проведения калибровочных измерений.

$$X_{3,i} = X_{2,i} \cdot \gamma \Big(X_{2,i} \Big),$$

где
$$\gamma(X_{2,i}) = \begin{cases} 1, e c \pi u \ X_{2,i} \ge \gamma_P \\ 0, e c \pi u \ X_{2,i} < \gamma_P \end{cases}$$

Из исходного массива информационного сигнала выделяются участки $\tilde{O}^{k}_{3,i}$ с одинаковой длительностью равной $t_{\mu a \delta a}$.

$$X_{3,j}^{k} = \mathop{Cut}_{i=(k-1)\cdot M} \left[X_{3,i} \right],$$

где *Cut[]* – процедура выделения участка информационного массива в указанных пределах.

Длительности $t_{ha\delta n}$ соответствуют М отсчетов АЦП, которые определяются $t_{ha\delta n} \times f_{\partial} = M$. Индекс *j* определяет порядковый номер отсчета в пределах одного выделенного участка $j \in [(k-1) \times M ... k \times M]$. Индекс *k* определяет порядковый номер выделенного участка в пределах всего записанного объема информации $k \in [1...Q]$. Количество выделенных участков сигнала *Q*, можно определить следующим образом:

$$Q = \frac{N}{M} = \frac{\left(t_{\max} - t_{\min}\right) \times f_d}{t_{\mu a \delta \pi} \times f_{\delta}} = \frac{\left(t_{\max} - t_{\min}\right)}{t_{\mu a \delta \pi}}$$

Время выделенного участка выбирается из пространственного масштаба ожидаемой аномалии, вызванной воздействием ГДИ. Далее осуществляется построение гистограммы распределения информационного

параметра по соответствующим интервалам изменения этого параметра. Исследуемый диапазон информационного параметра разбивается на конечное число интервалов по соответствующим значениям, каждому из которых присваивается порядковый номер. Эти интервалы в литературе [52] принято называть каналами гистограммы. За одинаковое для всех каналов время подсчитывается число отсчетов информационного параметра, значение которого лежит в пределах каждого интервала.

В случае, если количество каналов равно максимальному диапазону работы АЦП, то связь между номером канала и энергией является линейной.

Таким образом, формируется зависимость, где по оси абсцисс гистограмм (столбцовый индекс) откладывается номер канала гистограммы, а по оси ординат откладывается число событий с величиной измеряемых параметров волнения, соответствующих номерам каналов гистограммы.

Для зарегистрированного информационного сигнала лазерного сканирующего локатора одним из информационных параметров, как уже было сказано, является амплитуда импульсов. Тогда ДЛЯ каждого дискретного амплитудного распределения информации $X_{3,j}^k$ с индексом k, где $j \in [1...M]$, а M – общее количество отсчетов за время наблюдения, амплитудное распределение представляется в виде зависимости частоты попадания значений амплитуды сигнала в соответствующий интервал разбиения амплитуды C_q , где q – номер канала (интервала), C_q – число отсчетов в канале.

Рассмотрим алгоритм построения гистограмм на примере одного из информационных параметров сигнала макета сканирующего лазерного локатора – амплитуды импульсов. Для построения гистограммы распределения амплитуды разобьем весь объем информации на m интервалов. Длины интервалов примем равными и обозначим через $\Delta_1, ..., \Delta_q$, а середины интервалов группировки через $x_1, ..., x_q$.

Число наблюдений p_q в q-м интервале группировки равно количеству $X^k_{3,j}, j = 1,...,M$, удовлетворяющих неравенству

$$\left|X_{3,j}^{k}-x_{q}\right| < \frac{1}{2}\Delta_{q},$$

Введем величину $h_q = p_q/n$, которая определяет частоту попадания наблюдений в *q*-ый интервал группировки. Для устранения влияния размера интервала группировки на h_q , введем нормированную величину $f_q = \frac{h_q}{\Delta_a}$.

Теперь, обобщив для всего набора выделенных информационных массивов М, можно записать выражение для определения гистограммы распределения амплитуды импульсов.

$$C_{q}^{k} \left(X_{3,j}^{k} \right) = \mathbf{P} \left\{ \left| X_{3,j}^{k} - x_{q} \right| < \frac{1}{2} \Delta_{q} \right\},$$
(2.4)

где Р – вероятность события, заключенного в фигурных скобках.

Далее в процессе регистрации за каждые следующие промежутки времени наблюдения t_{набл.} вычисляется распределение амплитуд по (2.4) и записываются в массив. В результате такой обработки получаем матрицу гистограмм $C_Q(X_3^k)$, у которой первой координатой массива гистограмм (столбцовый индекс) является номер канала гистограммы. Номер канала определяет интервал амплитуд зарегистрированных прибором импульсов, метка которых помещается в данный канал. Второй координатой двумерного массива являлся временной индекс, соответствующий гистограмм оцифрованного дискретной временной последовательности сигнала. Значением массива гистограмм является число импульсов, амплитуда которых попадает в интервал, определяемый заданным номером канала гистограммы, а время начала записи данной последовательности импульсов значение соответствующего временного определяет индекса. Каждая гистограмма привязывается к соответствующей координате места, где она была зарегистрирована.

По полученным матрицам гистограмм вычисляются статистические характеристики для отдельных гистограмм, и формируется вектор признаков зарегистрированного сигнала. В качестве параметров, характеризующих степень изменчивости каждой гистограммы, на данном этапе обработки будем использовать статистические моменты, а именно: медиану распределения

$$\overline{p1_{k}} = \frac{\sum_{i=0}^{m} X_{3,i}^{k} \cdot C_{i}^{k} \left(X_{3,i}^{k} \right)}{\sum_{i=0}^{m} C_{i}^{k} \left(X_{3,i}^{k} \right)},$$
(2.5)

где *т* - число каналов гистограммы;

дисперсию по медиане

$$p1_{k}^{2} = \frac{\sum_{i=0}^{m} \left(X_{3,i}^{k} - \overline{p1_{k}}\right)^{2} C_{i}^{k} \left(X_{3,i}^{k}\right)}{\sum_{i=0}^{m} C_{i}^{k} \left(X_{3,i}^{k}\right)},$$
(2.6)

В результате может быть сформирован вектор признаков изменчивости зарегистрированного сигнала в виде:

$$\overrightarrow{\Theta}_{1} = \left(\overline{p1_{k}}, \quad p1_{k}^{2}; \quad t \right),$$
(2.7)

Для увеличения количества информационных признаков исходного сигнала, можно осуществлять дополнительную обработку исходного информационного сигнала по временным расстояниям между импульсами, обусловленными зеркальными бликами от морской поверхности.

В данном случае временное расстояние между импульсами определяется следующим образом:

$$L_{j}^{k} = pos\left[\max\left(X_{3,j+1}^{k}\right)\right] - pos\left[\max\left(X_{3,j}^{k}\right)\right],$$

где *pos* – функция определения временного положения *j*-ого импульса, max – функция определения максимума *j*-ого импульса, в пределах исследуемого участка записанного сигнала.

Затем по массиву L_i^k вычисляется гистограмма распределения расстояний между импульсами. Алгоритм построения гистограммы соответствует алгоритму, описанному при построении гистограммы распределения амплитуд информационного сигнала. Весь объем информации разбивается на *m* интервалов. Длины интервалов примем равными и обозначим через $\Delta_1,...,\Delta_q$, а середины интервалов группировки через $l_1,...,l_q$.

Тогда функция распределения расстояния между бликами будет иметь вид:

$$Ct_{q}^{k}\left(L_{j}^{k}\right) = \mathbf{P}\left\{\left|L_{j}^{k}-l_{q}\right| < \frac{1}{2}\Delta_{q}\right\},\tag{2.8}$$

Далее определяются статистические характеристики полученных по (2.8) распределений длительности между импульсами.

Также, как и в случае амплитудного распределения вычисляются медиана распределения

$$\overline{p2_{k}} = \frac{\sum_{i=0}^{m} L_{i}^{k} C t_{i}^{k} \left(L_{i}^{k} \right)}{\sum_{i=0}^{m} C t_{i}^{k} \left(L_{i}^{k} \right)},$$
(2.9)

и дисперсия по медиане

$$p2_{k}^{2} = \frac{\sum_{i=0}^{m} \left(L_{i}^{k} - \overline{p2_{k}} \right)^{2} Ct_{i}^{k} \left(L_{i}^{k} \right)}{\sum_{i=0}^{m} Ct_{i}^{k} \left(L_{i}^{k} \right)},$$
(2.10)

В результате получаем расширенный набор признаков изменчивости зарегистрированного информационного сигнала от морской поверхности, который можно представить в виде вектора:

$$\overrightarrow{\Theta}_{1} = \begin{pmatrix} \overline{p1_{k}}, & p1_{k}^{2}; & t \\ \frac{p2_{k}}{p2_{k}}, & p2_{k}^{2}; & t \end{pmatrix},$$

$$(2.11)$$

При проведении обработки в рамках данной работы, мы ограничились моментами первого и второго порядков, но для повышения количества отдельных информационных признаком можно использовать и другие моменты которыми могут характеризоваться полученные распределения, описанные в разделе 3 главы 1.

2.2. Разработка алгоритма предварительной обработки информации при регистрации параметров приповерхностного слоя морской среды

Как было указано в главе I, возникающие в толще моря гидродинамические возмущения вызывают изменение оптических свойств приповерхностного слоя морской среды. Эти изменения обусловлены наличием в приповерхностном слое взвешенных частиц, в том числе фитопланктона и растворенного органического вещества. ГДВ вызывают изменение фонового распределения этих частиц как по площади, так и по глубине, что в свою очередь приводит к изменению отраженного или рассеянного потока излучения от морской поверхности.

При разработке схемотехнической реализации выбранного метода регистрации изменения параметров концентрации фитопланктона и растворенного органического вещества в приповерхностном слое моря при воздействии ГДИ, будем исходить из того, что:

1. анализируется некоторая выборка случайного распределения пространственной изменчивости концентрации фитопланктона;

2. в пределах области большей, чем пространственный масштаб ГДВ, естественное распределение концентрации фитопланктона меняется незначительно;

3. в некоторой ограниченной области концентрация фитопланктона не зависит от параметров морской поверхности.

Для осуществления регистрации изменений концентрации фитопланктона И растворенного органического вещества В приповерхностном слое моря при воздействии ГДИ, на основе выполненного анализа определено, что оптимальным является применение оптикоэлектронного устройства, которое регистрирует восходящий от моря световой поток на нескольких длинах волн.

На основе выбранного метода была разработана схема двухканального фотометра яркости моря, которая представлена на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6 – Функциональная схема двухканального фотометра яркости моря

(П – поляризатор, Ф- фильтр, Об – объектив, М – модулятор, Д – диафрагма, ДР – дифракционная решетка, ОВ – оптическое волокно, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, ОП – оптопара, СУС – согласующий усилитель)

Входной поток от морской поверхности поступает в спектрофотометр ослабляющие через оптические фильтры, поляризатор И которые расположены перед объективом с фокусным расстоянием $f'_{i,i} = 10.5$ см. Далее установлена виньетирующая диафрагма, за которой расположен вращающийся диск, И далее входная щель монохроматора. Диск осуществляет периодическую модуляцию светового пучка с частотой 2кГц, с целью реализации при обработке алгоритма синхронного накопления сигнала с вычитанием темновых шумов. На выходе монохроматора входящий поток оптического излучения от морской поверхности раскладывается в спектр, из световодами диаметром которого многомодовыми 1 MM выделяются световые пучки с нужными длинами волн 540 нм и 440 нм. Использование световодов такого диаметра позволяет обеспечить выделение из всего спектрального состава оптического излучения от морской поверхности указанные спектральные линии шириной около 5 нм. Излучение, выделенное световодами, регистрируется двухканальным фотоприемным устройством на основе ФЭУ.

Величина зарегистрированного потока оптического излучения зависит от концентрации фитопланктона и растворенного органического вещества в области регистрации.

Общая схема первичной обработки сигнала спектрофотометра представлена на рисунке 2.7.





Как было сказано выше, в качестве приемника излучения используется два ФЭУ, которые регистрируют два восходящих от морской поверхности потока оптического излучения на двух выбранных длинах волн оптического излучения. Для последующего анализа необходимо осуществить запись следующих каналов двухканального фотометра яркости моря: сигнал канала А (на длине волны 440 нм), сигнал канала В (на длине волны 540 нм) и канал блокировки, который снижает межканальные наводки в АЦП. Длины волн оптического излучения, на которых осуществляется регистрация, были выбраны высокой низкой поглощательной способности согласно И фитопланктона, соответственно 440 и 540 нм.

Как и для макета сканирующего лазерного локатора выходные сигналы спектрофотометра через АЦП L-Card E14-440 поступают на компьютер, где

записываются в память. Схема регистрируемых сигналов двухканальным фотометром представлена на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Схема записи сигналов макета двухканального фотометра

Рассмотрим алгоритм предварительной обработки сигналов двухканального спектрофотометра. Поток излучения на двух выбранных длинах волн оптического излучения, восходящий от морской поверхности, запишем в виде:

$$\frac{\Phi_{\lambda 1}(K_a,t)}{\Phi_{\lambda 2}(K_a,t)},$$

где *K_a* - изменение концентрации фитопланктона в приповерхностном слое морской среды.

Данный поток регистрируется двухканальным фотометром, в котором ФЭУ осуществляет преобразование физической величины сигнала в электрический аналог. Преобразование можно записать в следующем виде:

$$U_{\phi \ni Y1}(t) = S_{\phi \ni Y1} \cdot \Phi_{\lambda 1}(K_a, t)$$

$$U_{\phi \ni Y2}(t) = S_{\phi \ni Y2} \cdot \Phi_{\lambda 2}(K_a, t)'$$
(2.12)

Так как используется два различных ФЭУ, то их параметры преобразования физической величины должны быть одинаковы $S_{\phi_{3}y_{1}} = S_{\phi_{3}y_{2}}$, для обеспечения минимальных ошибок преобразования с целью дальнейшего сравнения сигналов. Допустимо незначительное различие между $S_{\phi_{3}y_{1}}$ и

 $S_{\phi \ni y_2}$, но тогда необходимо вычислять поправочный коэффициент $K_{\partial} = \frac{S_{\phi \ni y_1}}{S_{\phi \ni y_2}}$, и далее один из сигналов должен нормироваться на величину данной поправки. В нашем случае будем рассматривать, когда $S_{\phi \ni y_1} = S_{\phi \ni y_2}$.

После приемника сигналы поступают на АЦП, который осуществляет процедуру дискретизации по времени и квантованию по уровню для двух сигналов. В результате операции дискретизации сигнал становиться определен в моменты времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i = t_{ouc}$.

$$X_{1}(t_{i}) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\phi \ni Y1}(t) \cdot \delta(t - t_{i}) dt$$
$$Y_{1}(t_{i}) = \int_{-\infty}^{\infty} U_{\phi \ni Y2}(t) \cdot \delta(t - t_{i}) dt$$

Процедура квантования сигналов описывается следующим математическим выражением:

$$X_{2}(t_{i}) = \Delta X \cdot ent \left[\frac{|X_{1}(t_{i})|}{\Delta X} + \kappa \right] \cdot sign(X_{1}(t_{i})),$$
$$Y_{2}(t_{i}) = \Delta Y \cdot ent \left[\frac{|Y_{1}(t_{i})|}{\Delta Y} + \kappa \right] \cdot sign(Y_{1}(t_{i}))$$

где ent[] - операция взятия целой части, ΔX - шаг квантования, κ - коэффициент округления, sign(X) - знаковая функция.

После операции дискретизации и квантования сигнальный массив можно представить в виде дискретного набора амплитуд, которые определены в отдельные моменты времени. Если каждому моменту времени присвоить порядковый номер, то массив амплитуд исходной информации можно представить в виде:

$$X_2(t_i) \equiv X_{2,i}$$
, где $i \in 1...N$
 $Y_2(t_i) \equiv Y_{2,i}$

Исходя из проведенных энергетических оценок уровней оптических сигналов, которые будут регистрироваться прибором, требуется дополнительная обработка, которая позволит увеличить отношение сигнал – шум в исходном сигнале. Поэтому следующим этапом обработки является синхронное накопление полезного сигнала.

Рассмотрим общий алгоритм процедуры синхронного накопления. Предположим, что прибором регистрируется сигнал величиной U_c и среднеквадратическое значение шума U_w , тогда отношение сигнал-шум можно записать в виде:

$$C/III = \frac{U_c}{\overline{U}_u}$$

Если осуществляется процедура синхронного накопления с вычитанием шумов, то на заданном промежутке времени производиться суммирование сигнала в виде:

$$U_{\Sigma} = U_{c_1} + U_{c_2} + \dots + U_{c_n} = n \cdot U_c$$

Для шума на заданном промежутке времени суммируется значение дисперсии шума, так как это случайная величина, в виде:

$$\bar{U}_{uL}^2 = \bar{U}_{u_1}^2 + \bar{U}_{u_2}^2 + \dots + \bar{U}_{u_n}^2 = n \cdot \bar{U}_{u_n}^2$$

Таким образом, отношение сигнал-шум после проведения процедуры синхронного накопления определяется:

$$C_{III} = \frac{U_{\Sigma}}{\sqrt{\overline{U}_{u\Sigma}^2}} = \frac{n \cdot U_c}{\sqrt{n \cdot \overline{U}_{u}^2}} = \sqrt{n} \frac{U_c}{\overline{U}_{u}}$$

Как можем видеть, в результате синхронного накопления происходит повышение отношения сигнал-шум в \sqrt{n} раз, где n – количество накоплений полезного сигнала.

Зная частоту дискретизации АЦП - f_d , можно определить количество отсчетов *N* оцифрованных в буфер за время записи, которое составляет:

$$N = t_{rec} \times f_d = \left(t_{\max} - t_{\min}\right) f_d$$

Для накопления полезного сигнала выбирается интервал времени накопления – $t_{\text{нак}}$, в результате чего из всего сигнала после накопления получиться $M = \frac{t_{rec}}{t_{i\,\hat{a}\hat{e}}}$ отсчетов. Математически процедура синхронного накопления описывается суммированием с учетом знаковой функции в следующем виде:

$$X_{3,j} = \frac{\sum_{i=1}^{B} (-1)^{q_i} X_{2,i+j}}{B},$$

$$Y_{3,j} = \frac{\sum_{i=1}^{B} (-1)^{q_i} Y_{2,i+j}}{B},$$
(2.13)

где q – коэффициент знака; B – число отсчетов в накоплении $B = \frac{t_{Hak}}{t_{ouc}}$;

$$j \in 1...M$$
.

Коэффициент q_i определяется согласно фазе опорного сигнала

$$q_i = \begin{cases} 1, Z_i \ge Z_{nop} \\ 2, Z_i < Z_{nop} \end{cases}$$
, при $i \in 1...B$

Следующим этапом обработки является определение отношения накопленных значений сигналов по двум каналам.

$$F_{j} = \frac{X_{3,j}}{Y_{3,j}},$$

Так как исходный сигнал отношения может быть подвержен различным помехам, то для их устранения необходимо проводить фильтрацию полезного сигнала. Для фильтрации сигнала отношения каналов осуществляется НЧ фильтрация сигнала, которая имеет вид (2.2). В случае дискретного сигнала интеграл свертки преобразуется в сумму и может быть записан в виде:

$$F_{1,i} = \sum_{h=-\frac{w_2}{2}}^{\frac{w_2}{2}} a_h \cdot F_{(i-h-w/2)}, \qquad (2.14)$$

где *a_i* – весовые коэффициенты фильтра.

В процедуре обработки фильтрация реализована посредством скользящего усреднения с шириной окна усреднения *w*, ширина которого выбирается согласно необходимой частоте среза.

Алгоритм выбора фильтра аналогичен описанному в разделе предварительной обработки сигналов сканирующего лазерного локатора. В зависимости от типа помехи настраивается ширина окна цифрового фильтра, после чего проводится фильтрация. Для случая простой фильтрации все коэффициенты фильтра будут равны 1, тогда выражение (2.14) может быть переписано в виде:

$$F_{1i} = \frac{1}{w} \sum_{h = -w_2}^{w_2} F_i(h+i)$$

Далее проводится обработка информации с целью выделения вектора информационных параметров зарегистрированного сигнала отношения каналов А и В. На первом уровне обработки осуществляется формирование массивов распределений (гистограмм) пространственных периодов в сигнале. Для ускорения процесса используются специальные матричные алгоритмы обработки.

Полученная зависимость отношения каналов разбивается на участки $F_{1,j}^{k}$ с одинаковой длительностью равной t_{hadon} , на которых осуществляется статистический анализ информационных параметров сигнала отношения каналов A и B. Искомый участок выбирается исходя из пространственного масштаба ожидаемой аномалии вызванной воздействием ГДИ

$$F_{2,j}^{k} = \operatorname{Cut}_{i=(k-1)\cdot M} \left[F_{1,i} \right]$$

где *Cut[]* – процедура выделения участка информационного массива в указанных пределах.

Времени $t_{\text{набл.}}$ будет соответствовать М отсчетов АЦП, которые определяются $t_{\text{набл.}} \times f_{\partial} = M$.Индекс *j* определяет порядковый номер отсчета в

пределах одного выделенного участка $j \in [(k-1) \times M ... k \times M]$. Индекс k определяет порядковый номер выделенного участка в пределах всего записанного объема информации $k \in [1...Q]$. Количество выделенных участков сигнала Q можно определить следующим образом:

$$Q = \frac{N}{M} = \frac{\left(t_{\max} - t_{\min}\right) \times f_d}{t_{\text{Habs.}} \times f_d} = \frac{\left(t_{\max} - t_{\min}\right)}{t_{\text{Habs.}}}$$

Одним из информационных параметров сигнала являются интервалы времени между узловыми точками зависимости отношения каналов A и B $\Delta T_{j}^{k} = T_{j+1}^{k} - T_{j}^{k}$, где $j \in 1...M - 1$, а T_{j}^{k} и T_{j+1}^{k} – узлы зависимости отношения двух каналов фотометра (рис.2.9).



Рисунок 2.9. – Пример определения времени между узловыми точками для сигнала отношения каналов фотометра

Тогда формируется массив узловых точек в виде:

$$T_{j}^{k} = pos\left\{\left(sign\left[F_{2,j}^{k} - U_{ii\delta}\right] \times sign\left[F_{2,j+1}^{k} - U_{ii\delta}\right]\right) \le 0\right\},\$$

где *pos*{} - функция определения положения элемента массива удовлетворяющего заданному условию.

Алгоритм построения гистограмм такой же, как в случае сканирующего лазерного локатора. Весь объем информации разбиваем на m интервалов одинаковой длительности. Длины интервалов обозначим через $\Delta_1, ..., \Delta_a$, а середины интервалов группировки через $t_1, ..., t_a$.

Число наблюдений p_q в *q*-м интервале группировки равно количеству $\Delta T^k_{\ j}, \ j = 1,..., M-1$, удовлетворяющих неравенству:

$$\left|\Delta T^{k}_{j} - t_{q}\right| \leq \frac{1}{2}\Delta_{q}$$

Таким образом, гистограмма распределения информационного параметра сигнала отношения может быть описана следующим выражением:

$$D_{q}^{k}\left(\Delta T_{j}^{k}\right) = \mathbf{P}\left\{\left|\Delta T_{j}^{k} - t_{q}\right| \leq \frac{1}{2}\Delta_{q}\right\}, q \in 1...m$$
(2.15)

Гистограмма рассчитывается за одинаковые промежутки времени, в результате получаем набор гистограмм, которые представляются в виде матрицы $D_o^k (\Delta T_i^k)$, где k – количество рассчитанных гистограмм.

Как можем видеть, распределение информационного параметра формируется по такой же зависимости, как и в случае сканирующего локатора (2.4). По полученным матрицам гистограмм вычисляются статистические характеристики для отдельных гистограмм и формируется вектор признаков зарегистрированного сигнала. В качестве параметров, характеризующих степень изменчивости каждой гистограммы, будем использовать различные статистические моменты, но в рамках данной работы мы, как и для сканирующего локатора, ограничимся двумя моментами:

медианой распределения

$$\overline{p3_k} = \frac{\sum_{i=0}^m \Delta T_i^k \cdot D_i^k \left(\Delta T_i^k \right)}{\sum_{i=0}^m D_i^k \left(\Delta T_i^k \right)},$$
(2.16)

и дисперсией по медиане

$$p3_{k}^{2} = \frac{\sum_{i=0}^{m} \left(\Delta T_{i}^{k} - \overline{p3_{k}}\right)^{2} D_{i}^{k} \left(\Delta T_{i}^{k}\right)}{\sum_{i=0}^{m} D_{i}^{k} \left(\Delta T_{i}^{k}\right)},$$
(2.17)

Таким образом, в результате получим набор признаков изменчивости зарегистрированного сигнала:

$$\overrightarrow{\Theta_2} = \left(\overrightarrow{p3_k}, \quad p3_k^2; \quad t \right), \tag{2.18}$$

Как видим, полученный набор признаков аналогичен вектору, полученному после проведения предварительной обработки сигналов лазерного сканирующего локатора. Данный вектор будет использоваться для дальнейшего анализа и выявления воздействий ГДИ на информационный сигнал, а также при проведении процедуры комплексирования.

2.3. Разработка алгоритма предварительной обработки информации при регистрации параметров приводного слоя атмосферы

Третьей средой, в которой осуществлялась регистрация проявлений ГДВ, является приводный слой атмосферы. Гидродинамические воздействия, происходящие в морской толще, вызывают изменение состояния приводного слоя атмосферы, в частности изменение концентрации аэрозольных частиц над морской поверхностью. Возможность применения дистанционного оптического зондирования для регистрации изменений параметров приводного аэрозоля была показана в [43]. Воздействие ГДВ приводит к перемещению пузырьков воздуха внутри морской среды в направлении к При выходе пузырька через поверхность в атмосферу поверхности. формируется дополнительные частички аэрозольных компонентов, что приводит к локальному изменению фоновой концентрации [44].

Для регистрации изменений концентрации аэрозоля в приводном слое атмосферы при воздействии ГДВ, на основе выполненного анализа методов был выбран метод непрерывного лазерного зондирования приводного слоя атмосферы. На основе данного метода был разработан макет аэрозольного лидара на основе непрерывного лазерного источника, оптическая схема которого представлена на рисунке 2.10.

При разработке метода регистрации изменений параметров приводного слоя атмосферы будем исходить из того что:

1. анализируется некоторая выборка случайного распределения пространственных изменений концентрации аэрозоля;

2. в пределах зоны большей чем масштаб ГДВ будем считать, что фоновая концентрация аэрозоля будет меняться незначительно;

в пределах ограниченной области и временного интервала порядка
 с концентрация аэрозоля не подвержена внешним воздействиям.



Рисунок 2.10 – Оптическая схема аэрозольного лидара (ФП – фотоприемник, ИФ – интерференционный светофильтр, Д –диафрагма) Аэрозольный лидар был построен по параксиальной схеме с базовым расстоянием между передающим и приемным каналами *d* = 350 мм. В состав схемы входят два канала: лазерный осветительный канал и приемный оптико-электронный канал. Угол между оптическими осями передающего и приемного каналов *α* составлял 1°, что обеспечивало перекрытие угловых полей приемного и осветительного каналов на расстоянии в 25 м от основания лидара. Лазерный осветительный канал содержит твердотельный лазер [91] с рабочей длиной волны 0.532 мкм, и мощностью в непрерывном режиме излучения 100 мВт. Его излучение прерывалось механическим модулятором, осуществляющим периодическую модуляцию с частотой 1.5 кГц. Вид диска модулятора представлен на рис. 2.10.

Приемный канал представляет собой оптико-электронную систему, включающую зеркальный объектив, построенный по схеме Кассегрена и

фотоприемное устройство на основе фото-электронного умножителя. Перед входным окном фотоприемного устройства размещается диафрагма, ограничивающая угловое поле приемного канала и интерференционный светофильтр. Размеры диафрагмы составляли a = 1 мм и b = 0,5 мм. Таким образом пространство, с которого регистрировалось рассеянное оптическое излучение составляет величину в 20 см. Для осуществления спектральной селекции зондирующего лазерного излучения от фоновых составляющих, аэрозольный лидар содержит интерференционный фильтр в составе фотопремного устройства, расположенного перед входным окном приемника излучения.

Для контроля амплитудной модуляции лазерного излучения использовалась оптопара, установленная на модуляционный диск. Сигнал с оптопары использовался как опорный для определения моментов открытия и закрытия зондирующего лазерного излучения. Модуляция зондирующего лазерного излучения необходима для реализации алгоритма синхронного накопления полезного сигнала. В соответствие с проведенными теоретическими расчетами, уровень регистрируемого сигнала обратного рассеяния мог составлять величины в пределах 1-2x10⁻¹⁴ Вт. При таких значениях регистрируемого потока отношение сигнал – шум системы равно 1, т.е. полезный сигнал не превосходит уровень шума приемника излучения. В результате применения режима синхронного накопления сигнала можно существенно повысить отношение сигнал-шум.

Схема первичной обработки сигналов аэрозольного лидара представлена на рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Схема первичной обработки сигналов аэрозольного лидара

Выходные сигналы аэрозольного лидара через АЦП L-Card E14-440 поступают на компьютер, где записываются в память. Для проведения последующего анализа и обработки, необходимо записывать следующие сигналы аэрозольного лидара:

- основной сигнал с канала измерений;

- сигнал синхронизации модуляции (опорный канал);

- блокирующий сигнал, предназначенный для снижения межканальных наводок внутри АЦП.

Схема прохождения сигналов от аэрозольного лидара представлена на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Схема записи сигналов макета аэрозольного лидара

Обработка оцифрованных сигналов проводилась по специальному алгоритму. Структурная схема алгоритма обработки представлена на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Структурная схема обработки сигналов макета аэрозольного лидара

Теперь рассмотрим алгоритм предварительной обработки сигналов аэрозольного лидара. Рассеянный поток оптического излучения в приводном слое атмосферы зависит от концентрации приводного аэрозоля, запишем в виде:

$$\Phi_a(\varepsilon_a,t),$$

где ε_a - коэффициент, определяющий концентрацию приводного аэрозоля.

Фотоприемное устройство на основе ФЭУ осуществляет линейное преобразование измеряемой величины в электрический сигнал.

$$U_{c}(t) = S_{\phi \ni y} \cdot \Phi_{a}(\varepsilon_{a}, t), \qquad (2.19)$$

После приемника сигналы поступают на АЦП, который осуществляет процедуру дискретизации по времени и квантованию по уровню регистрируемого сигнала. В результате операции дискретизации сигнал становится определен в моменты времени $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i = t_{ouc}$.

$$Z_1(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} U_C(t) \cdot \delta(t-t_i) dt,$$

Квантование сигналов можно записать в виде:

$$Z_{2}(t_{i}) = \Delta Z \cdot ent\left[\frac{|Z_{1}(t_{i})|}{\Delta Z} + \kappa\right] \cdot sign(Z_{1}(t_{i})),$$

где ent[] - операция взятия целой части, ΔZ - шаг квантования, κ - коэффициент округления, sign(X) - знаковая функция.

После операции дискретизации и квантования записанный массив сигналов можно представить в виде дискретного набора амплитуд, которые определены в отдельные моменты времени и если каждому моменту времени присвоить порядковый номер, то массив амплитуд исходной информации можно представить в виде:

$$Z_2(t_i) \equiv Z_{2,i}$$
, где $i \in 1...N$

На следующем этапе обработки осуществляется процедура синхронного накопления полезного сигнала, которое позволяет увеличить полезный сигнал по сравнению с шумами. Алгоритм процедуры синхронного накопления аналогичен используемому при обработке сигналов макета двухканального фотометра. В результате, применяя процедуру синхронного накопления, происходит повышение отношения сигнал-шум в \sqrt{n} раз, где n – количество элементов накопления.

Если время записи t_{3an} , то в соответствии с частотой дискретизации f_{ouc} , можно вычислить количество записанных отчетов $N = t_{3an} \cdot f_{ouc}$. Для накопления полезного сигнала выбирается интервал времени накопления – t_{Hak} , что приводит к тому, что из всего сигнала после накопления получится

 $M = \frac{t_{3an}}{t_{Hak}}$ отсчетов. Математически процедуру синхронного накопления можно

записать в следующем виде:

 $j \in 1...M$.

$$Z_{3,j} = \frac{\sum_{i=1}^{B} (-1)^{q_i} Z_{2,i+j}}{B},$$
(2.20)

где q – коэффициент знака; B – число отсчетов в накоплении $B = \frac{t_{\text{нак}}}{t_{\text{duc}}}$,

Коэффициент q_i определяется согласно фазе опорного сигнала $q(i) = \begin{cases} 1, Z(i) \ge Z_{nop} \\ 2, Z(i) \ge Z_{nop} \end{cases}$, при $i \in 1...B$

В результате синхронного накопления происходит сжатие сигнала по времени до *М* отсчетов.

Далее проводится обработка информации с целью выделения вектора информативных признаков зарегистрированного сигнала обратного рассеяния. На первом уровне обработки осуществляется формирование массивов распределений (гистограмм) амплитуд сигнала. Для ускорения процесса используются специальные матричные алгоритмы обработки.

Построение гистограмм осуществляется следующим образом, полученный сигнал обратного рассеяния разбивается на участки $Z^{k}_{3,j}$ с одинаковой длительностью равной $t_{\mu a \delta n}$.

$$Z_{3,j}^{k} = \operatorname{Cut}_{i=(k-1)\cdot M} \left[Z_{3,i} \right],$$

где *Cut[]* – процедура выделения участка информационного массива в указанных пределах.

Для выделенных участков осуществляется статистический анализ информационных параметров сигнала обратного рассеяния аэрозольного лидара. Времени $t_{\text{набл.}}$ будет соответствовать М отсчетов АЦП, которые определяются $t_{\text{набл.}} \times f_{\partial} = M$. Индекс *j* определяет порядковый номер отсчета в

пределах одного выделенного участка $j \in [(k-1) \times M ... k \times M]$. Индекс k определяет порядковый номер выделенного участка в пределах всего записанного объема информации $k \in [1...Q]$. Количество выделенных участков сигнала Q, можно определить следующим образом:

$$Q = \frac{N}{M} = \frac{\left(t_{\max} - t_{\min}\right) \times f_d}{t_{\text{HAGA.}} \times f_d} = \frac{\left(t_{\max} - t_{\min}\right)}{t_{\text{HAGA.}}}$$

Время выделенного участка выбирается из пространственного масштаба ожидаемой аномалии, вызванной воздействием ГДИ.

Построение гистограмм распределения значений амплитуд в зарегистрированном сигнале осуществляется по методике, описанной ранее для макетов сканирующего лазерного локатора и двухканального фотометра яркости моря. Весь объем информации разбивается на *m* интервалов одинаковой длительности. Длины интервалов обозначим через $\Delta_1, ..., \Delta_q$, а середины интервалов группировки через $z_1, ..., z_q$.

Число наблюдений p_q в q-м интервале группировки равно количеству $Z_{3,j}^{k}$, j = 1, ..., M - 2, удовлетворяющих неравенству:

$$\left|Z_{3,j}^{k}-t_{q}\right| \leq \frac{1}{2}\Delta_{q}$$

Таким образом, гистограмма распределения информационного параметра сигнала обратного рассеяния может быть описана следующим выражением:

$$E_{q}^{k}\left(Z_{3,j}^{k}\right) = \mathbf{P}\left\{\left|Z_{3,j}^{k} - z_{q}\right| < \frac{1}{2}\Delta_{q}\right\}, \ q \in 1...m,$$
(2.21)

где Р – вероятность события, заключенного в фигурных скобках.

Как видно, распределение информационного параметра формируется по такой же зависимости, как и в случае сканирующего локатора (2.4) и двухканального фотометра (2.15). Соответственно, на данном этапе происходит приведение различных информационных сигналов к единому пространству описания их признаков. Гистограмма рассчитывается за одинаковые промежутки времени $t_{i \, d d d e}$, в результате получаем набор гистограмм, которые представляются в виде матрицы $E_Q^k(Z_{3,j}^k)$, где k – количество рассчитанных гистограмм. Каждая гистограмма привязывается к соответствующей пространственной координате места, где она была зарегистрирована.

По полученной матрице $E_Q^k(Z_{3,j}^k)$ вычисляются статистические характеристики для отдельных гистограмм, и формируется вектор признаков зарегистрированного сигнала. В качестве параметров, характеризующих степень изменчивости каждой гистограммы, на данном этапе обработки будем использовать следующие статистические моменты:

Медиана распределения

$$\overline{p4_{k}} = \frac{\sum_{i=0}^{m} Z_{3,i}^{k} \cdot E_{i}^{k} \left(Z_{3,i}^{k} \right)}{\sum_{i=0}^{m} E_{i}^{k} \left(Z_{3,i}^{k} \right)},$$
(2.22)

дисперсия по медиане

$$p4_{k}^{2} = \frac{\sum_{i=0}^{m} \left(Z_{3,i}^{k} - \overline{p4_{k}}\right)^{2} E_{i}^{k} \left(Z_{3,i}^{k}\right)}{\sum_{i=0}^{m} E_{i}^{k} \left(Z_{3,i}^{k}\right)},$$
(2.23)

Таким образом, в результате получаем набор признаков изменчивости сигнала аэрозольного лидара:

$$\overrightarrow{\Theta_3} = \left(\overline{p4_k}, \quad p4_k^2; \quad t \right), \tag{2.24}$$

Как видим, получен набор признаков, который аналогичен вектору, полученному после проведения предварительной обработки сигналов макета сканирующего лазерного локатора и двухканального фотометра яркости моря. Данный вектор будет использоваться для дальнейшего анализа и выявления воздействий ГДИ на информационный сигнал, а также при проведении процедуры комплексирования.

2.4. Математическая модель комплексирования обработки данных

Согласно описанной в разделе 3 главы 1 идее комплексирования, нужно иметь три одинаковых по типу информационных сигнала, которые объединяются для формирования общей выходной оценки воздействия, вызванного ГДИ.

Алгоритм первичной обработки, описанный в разделах 2.1, 2.2, 2.3 главы 2, позволяет привести различные по своей физической природе информационные параметры сигналов к одинаковой системе измерения, т. е. на этапе предварительной обработки происходит масштабирование сигналов.

До проведения комплексирования необходимо все информационные параметры нормировать. Для этого будем использовать следующий алгоритм. Для каждого полученного набора признаков по (2.4, 2.15, 2.21) осуществляется процедура нормировки.

$$\Theta_{j}^{i} = \frac{\Theta_{j}^{i} - \Theta^{\min}}{\Theta^{\max} - \Theta^{\min}},$$
(2.25)

где *i* – индекс канала, *j* – индекс текущего элемента в канале.

В результате каждый набор признаков изменчивости нормирован к пределам [0,1]. Теперь все информационные каналы не только масштабированы, но и нормированы.

Полученные векторы информационных признаков теперь можно комплексировать. В качестве наиболее подходящего метода комплексирования был выбран метод фильтрации.

Рассмотрим задачу комплексирования измерений от трех независимых датчиков (метод измерения). Обобщенная функциональная схема такой комплексной измерительной системы представлена на рис.2.14



Рисунок 2.14 – Обобщенная функциональная схема комплексной измерительной системы

На схеме $\mathcal{A}_1...\mathcal{A}_3$ – разнотипные датчики, регистрирующие одно и то же гидродинамическое явление, $x_1(t)...x_3(t)$ – выходные сигналы этих датчиков. Вычислитель на основе измерений от разных датчиков $x_1(t)...x_3(t)$ формирует комплексную оценку g(t) измеряемой величины. При выработки комплексной оценки g(t) с точностью большей чем при использовании отдельных датчиков, алгоритм работы вычислителя зависит от многих факторов. В общем случае этот алгоритм может описываться дифференциально-разностными уравнениями.

Предположим, что гидродинамическое воздействие g(t) влияет на три среды, меняя их параметры, которые в свою очередь регистрируются дистанционными методами с погрешностями $v_i(t)$. Данные погрешности для каждого канала регистрации разные и зависят от метеоусловий (рис. 2.15).



Рисунок 2.15 – Эквивалентная структурная схема комплексной системы На рисунке V_i – погрешность датчика, $F_i(p)$ – передаточная функция вычислителя, $x_i(t)$ – выходной сигнал i-ого датчика.

Каждый из каналов вычислителя представляет собой линейный динамический фильтр. В соответствии со структурной схемой для изображения выходного сигнала комплексной системы g(t) и ошибки измерения $\delta(t) = g(t) - g(t)$ можно записать:

$$G(p) = \sum_{i=1}^{3} W_{gi}(p) F_{i}(p) G(p) + \sum_{i=1}^{3} W_{gi}(p) F_{i}(p) V_{i}(p),$$

$$E(p) = G(p) - G(p) = \left[1 - \sum_{i=1}^{3} W_{gi}(p) F_{i}(p)\right] \times G(p) - \sum_{i=1}^{3} W_{gi}(p) F_{i}(p) V_{i}(p)$$
(2.26)

Как (2.26)ошибка измерения видно ИЗ не зависит OT g(t),гидродинамического воздействия она определяется только погрешностями, вызываемыми воздействием метеоусловий. Для получения g(t),гидродинамическому воздействию системы инвариантной К передаточные функции каналов вычислителя выбирают так. чтобы выполнялось условие.

$$\sum_{i=1}^{3} W_{gi}(p) F_{i}(p) = 1, \qquad (2.27)$$

Соблюдение этого условия очень важно, если комплексная система выполняет роль чувствительного элемента для какой-либо другой системы принятия решения (например, пороговое устройство) динамические свойства которой должны быть достаточно высокими. Так как условие (2.27) накладывает ограничения лишь на «взвешенную» сумму передаточных функции $F_i(g)$, а не на каждую из них в отдельности, то остается определенная свобода в их выборе, которая может быть использована для уменьшения ошибки от погрешностей датчиков.

Рассмотрим принцип построения трехканальной комплексной системы. Предположим, что гидродинамическое воздействие g(t) регистрируется тремя независимыми датчиками. Допустим, что каждый датчик имеет единичный коэффициент передачи. У каждого датчика своя погрешность измерения $v_i(t)$, которая связана с гидрометеорологическими условиями в которых проводятся измерения. Тогда выходной сигнал может быть представлен в виде аддитивной суммы полезного сигнала и помехи.

$$x_i(t) = g(t) + v_i(t),$$
 (2.28)

В данном случае схему комплексирования можно представить в следующем виде (рис. 2.16).



Рисунок 2.16. – Схема комплексирования с учетом метеоусловий

По известным метеоусловиям в момент регистрации формируются весовые коэффициенты, учитывающие степень влияния метеоусловий на точность данного канала. Данные коэффициенты определяют вес при учете того или иного информационного канала в единую оценочную функцию посредством суммирования сигналов трех каналов.

Таким образом, применяя различные весовые коэффициенты, существует возможность компенсировать падение чувствительности базового метода измерения за счет дополнительных каналов измерения. На основе проведенных рассуждений можно комплексную систему представить следующим математическим выражением.

$$g_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^{N} p_i \Theta_i(t), \qquad (2.29)$$

где p_i - коэффициенты учитывающие влияние гидрометеорологических факторов, Θ_i - информационные признаки каждого канала.

На основе полученной оценки определяются области, где присутствуют гидродинамические возмущения. Для выявления этих областей используется пороговое сравнение комплексной оценки со значением среднеквадратического отклонения этой оценки.

$$\left| f_{\Sigma}^{\Gamma \square U} - f_{\Sigma}^{\phi_{OH}} \right| \ge \delta_{_{OMK}}, \tag{2.33}$$

В результате чего осуществляется выделение участков сигнала, где возможно наличие аномалий, вызванных воздействием ГДВ.

Весь алгоритм регистрации ГДИ можно разделить на три этапа:

1. определение аномальных участков зарегистрированного сигнала;

2. уточнение параметров аномальных участков зарегистрированного сигнала;

3. корреляционный поиск подобных структурных изменений в пределах аномальных участков зарегистрированного сигнала.

2.5. Методика выявления структуры аномалий комплексного сигнала

На основе полученной комплексной оценки (2.29) были определены аномальные участки вдоль траектории движения носителя аппаратуры. В качестве исходных информационных компонентов комплексной системы использовались моменты полученных распределений информационных параметров исходных сигналов (2.4, 2.15, 2.21). Эти моменты были получены для всего ансамбля значений выбранных информационных параметров, но если провести статистический анализ параметров сигналов в заданных границах значений, которые будут оптимальным образом подобраны, то можно провести дополнительную фильтрацию аномальных участков оценочной функции.

Как известно, различные ГДИ могут проявляться не во всем динамическом диапазоне измеряемых параметров, а лишь в какой-то узкой области, которая характеризует данное ГДИ. Поэтому вторым этапом повышения эффективности выявления участков оценочной функции будет проводиться расчет параметров распределений только в ограниченном диапазоне изменений, которые определяются ГДИ. В качестве примера рассмотрим расчет параметров распределений информационных признаков для метода сканирования морской поверхности.

Как было описано в разделе 2.1 Главы 2, для метода сканирования морской поверхности после предварительной обработке имеем распределения информативного параметра сигнала следующего вида:

$$C_{q}^{k} \left(X_{3,j}^{k} \right) = \mathbf{P} \left\{ \left| X_{3,j}^{k} - x_{q} \right| < \frac{1}{2} \Delta_{q} \right\},$$
(2.30)

Определение параметров отдельных гистограмм распределений теперь будет проводиться в пределах значений параметра, определяемых ГДИ.

Медиана распределения

$$\overline{p1_{k}} = \frac{\sum_{i=m_{b}}^{m_{e}} X^{k}_{3,i} \cdot C^{k}_{i} \left(X^{k}_{3,i} \right)}{\sum_{i=m_{b}}^{m_{e}} C^{k}_{i} \left(X^{k}_{3,i} \right)},$$
(2.31)

Дисперсия по медиане

$$p1_{k}^{2} = \frac{\sum_{i=m_{b}}^{m_{e}} \left(X_{3,i}^{k} - \overline{p1_{k}}\right)^{2} C_{i}^{k} \left(X_{3,i}^{k}\right)}{\sum_{i=m_{b}}^{m_{e}} C_{i}^{k} \left(X_{3,i}^{k}\right)},$$
(2.32)

где *m_b*, *m_e* – значения начала и завершения изменения информационного признака соответственно.

Набор уточненных признаков зарегистрированного информационного сигнала от морской поверхности, также можно представить в виде вектора:

$$\overrightarrow{\Theta}_{1} = \left(\overline{p1_{k}}, \quad p1_{k}^{2}; \quad t \right), \tag{2.33}$$

В результате применяя данную методику для каждого метода формируются вектора уточненных регистрации признаков, которые (2.29)комплексируются по с весовых коэффициентов учетом гидрометеорологических факторов и в результате получаем комплексную оценку f_{κ} , которая будет оптимальным образом выделять влияние ГДИ на информационные сигналы. Наличие ГДИ определяется из условия отклонения комплексной оценки от своего фонового значения больше чем на $\delta_{om\kappa\pi}$.

$$\left| f_{\Sigma}^{\Gamma \mathcal{I} \mathcal{U}} - f_{\Sigma}^{\phi o \mu} \right| \ge \delta_{om\kappa}, \qquad (2.34)$$

В выражении (2.34) знак неравенства определяется исходя из того какой информационный признак сигналов используется для построения комплексной оценки.

Теперь можем проводить поиск структурно-подобных изменений в выделенных аномальных участках комплексной оценочной функции. Для

этого отдельные участки комплексной оценки подвергается корреляционной обработке.

Процедура корреляционной обработки можно записать в следующем виде:

Вычисляем попарно коэффициент корреляции выделенных участков комплексной оценочной функции:

$$r_{f_i f_j} = \frac{\sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} \left(f_{\Sigma i} - \overline{f_{\Sigma i}} \right) \left(f_{\Sigma j} - \overline{f_{\Sigma j}} \right)}{N \sigma_{f_i} \sigma_{f_j}},$$
(2.35)

Данная собой процедура представляет масштабное вычисление коэффициента корреляции для всех выделенных участков оценочной функции. В результате формируется чего матрица коэффициентов корреляции вида:

$$R_{f_{i}f_{j}} = \begin{pmatrix} r_{f_{1}f_{1}} & r_{f_{1}f_{2}} & \cdots & r_{f_{1}f_{N}} \\ r_{f_{2}f_{1}} & r_{f_{2}f_{2}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ r_{f_{N}f_{1}} & & & r_{f_{N}f_{N}} \end{pmatrix},$$
(2.36)

Диагональ данной матрицы представляет собой коэффициенты корреляции равные 1, т.е. автокорреляция выделенного участка.

Далее вычисляется масштабный коэффициент корреляции, т.е. выделается из матрицы коэффициентов корреляции блочная матрица вида:

$$R_{k} = \begin{pmatrix} r_{f_{F}f_{F}} & r_{f_{F}f_{F+1}} & \cdots & r_{f_{F}f_{M}} \\ r_{f_{F+1}f_{F}} & r_{f_{F+1}f_{F+1}} & & \\ \vdots & & \ddots & \\ r_{f_{M}f_{F}} & & & r_{f_{M}f_{M}} \end{pmatrix},$$
(2.37)

Для каждой блочной матрицы вычисляется масштабная свертка для выделения структурно связанных элементов информационных сигналов, который соответствует структурным аномалиям вызванным воздействием ГДИ.
$$Sv(R_i, R_j) = \sum_{k=F}^{M} \sum_{l=F}^{M} R_i(k, l) \cdot R_j(i-k, j-l), \qquad (2.38)$$

В результате получаем зависимость, которая определяет наличие подобных структурных элементов в сигнале, которые являются отличительной особенностью воздействия некоторых ГДИ.

Выводы к главе

В рамках второй главы были разработаны алгоритмы формирования вектора информационных признаков для сигналов с трех разработанных макетов дистанционной оптической аппаратуры, входящей в состав комплекса для регистрации ГДИ.

Также была разработана методика определения структурных особенностей векторов информационных признаков.

На основе разработанных алгоритмов создан программный пакет в среде программирования MathLab, который позволяет обрабатывать записанные файлы.

ГЛАВА 3. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА В НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В данной главе рассмотрены экспериментальные исследования возможностей повышения эффективности регистрации гидродинамических источников с использованием комплексного подхода как к регистрации, так и к обработке.

Основной задачей натурных экспериментов является регистрация ГДИ в одинаковых гидрологических условиях, но различных метеорологических. Такая позволяет эффективность постановка эксперимента сравнить отдельных методов регистрации с комплексной системой. Организация такого эксперимента является сложной задачей, поскольку гидро-И метеоусловия нельзя создать искусственно, их можно только спрогнозировать. С целью минимизации изменений гидрологических условий для проведения эксперимента был выбран небольшой участок морской акватории с незначительными перепадами глубины.

3.1. Предварительные испытания и калибровки разработанного комплекса дистанционной оптической аппаратуры

Первым экспериментальных исследований этапом являются лабораторные испытания созданного макета комплексной аппаратуры. Для всех отдельных каналов комплексной системы были проведены калибровки и предварительные натурные эксперименты по регистрации искусственно созданных ГДВ. Задачей было определить работоспособность каждого канала макета комплексной аппаратуры, а также регистрировать изменения параметров исследуемых сред, которые проявляются В изменении информационных параметров сигналов. Разработанные алгоритмы выделяют информационные параметры из регистрируемых сигналов каждым прибором и рассчитывают статистические распределения этих параметров.

Для сигнала макета сканирующего лазерного локатора одним из информационных параметров является амплитуда регистрируемых импульсов от зеркальных бликов. Проверка эффективности работы прибора заключалась В регистрации фонового состояния параметров морской при воздействии ГДИ. поверхности И При сравнении полученных наблюдаться распределений должно различие В статистических характеристиках амплитуд сигнала.

Одним информационных ИЗ параметров для сигнала макета двухканального фотометра яркости моря является интервал времени между узловыми точками. При регистрации сигналов из приповерхностного слоя морской среды, где не происходит изменения концентрации фитопланктона, выходной сигнал фотометра должен быть постоянен. Если осуществить искусственное воздействия на фитопланктон, то его концентрация должна поменяться по сравнению с фоновым состоянием, и тем самым привести к изменению сигнала отношения каналов. Таким образом, в качестве проверки эффективности прибора необходимо провести регистрацию сигналов из приповерхностного слоя морской среды в отсутствии и в присутствии ГДВ.

Информационным параметром сигнала макета аэрозольного лидара сигнала. Для проверки эффективности работы является амплитуда аэрозольного разработанного макета лидара, так же, как И ДЛЯ двухканального фотометра, необходимо провести регистрацию сигналов из приводного слоя атмосферы при условии отсутствия и присутствия ГДВ в толще.

Рассмотрим лабораторные и предварительные натурные испытания для каждого разработанного канала комплексной системы отдельно.

3.1.1. Лабораторные испытания макета сканирующего лазерного локатора

Разработанный макет сканирующего лазерного локатора описан в разделе 2.1 главы 2. В данном разделе рассмотрим проведенные калибровки и пробные натурные измерения проявлений ГДВ на морской поверхности от ГДИ.

111

Предварительные испытания и калибровки макета сканирующего лазерного локатора проводились в два этапа:

- лабораторные испытания;
- натурные испытания.

В рамках лабораторных испытанный макет сканирующего лазерного локатора устанавливался на столе без внешнего защитного кожуха (фото 3.1) на расстоянии 8 м от черного экрана (фото 3.2). Такое расположение обеспечивает удобный доступ ко всем внутренним частям макета локатора, что позволяет осуществлять его юстировку и настройку. Схема проведения калибровочных измерений представлена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема проведения лабораторный испытаний



Фото 3.1 – Размещение сканирующего лазерного локатора при проведении лабораторных испытаний

В центре черного экрана на специальном держателе устанавливаются эталонные отражательные поверхности с известным радиусом кривизны.

Макетом сканирующего лазерного локатора регистрируются сигналы, отраженные от этих эталонных поверхностей. Для снижения паразитных отражений лазерного излучения от различных предметов, расположенных за эталонной поверхностью, использовался экран черного цвета и матовой фактуры (фото 3.2).



Фото 3.2 – Вид экрана для размещения эталонных поверхностей

В процессе выполнения калибровочных экспериментов записаны выходные сигналы макета сканирующего лазерного локатора при различных режимах его работы. Полученные файлы позволяют оценить уровень собственных шумов макета локатора, которые составляют около 50 мВ. Также были записаны сигналы от различных эталонных поверхностей. Фрагмент записи сигнала сканирующего лазерного локатора приведен на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 – Фрагмент записи сигнала сканирующего лазерного локатора Эти файлы обработаны по специальной программе определения амплитуды сигнала для различных эталонных поверхностей, в результате чего получена зависимость амплитуды зарегистрированных импульсов от радиуса кривизны эталонных поверхностей (рисунок 3.3). На основе теоретических расчетов, можно определить зависимость амплитуды зеркального блика от параметров морского волнения. С использованием этой зависимости теоретически рассчитаны величины отраженного потока оптического излучения, и затем определены амплитуды сигнала.





(пунктирная – теоретическая кривая, сплошная – практическая)

Из рисунка видим, что полученная кривая хорошо соответствует теоретической кривой в области радиусов от 10 мм до 70 мм. Эта область радиусов соответствует мелкомасштабному поверхностному волнению. Данный диапазон, как было сказано в главе 1, представляет наибольший интерес с точки зрения регистрации ГДИ, так как в этом диапазоне морского волнения ГДВ имеют максимальное влияние. Таким образом, разработанный макет удовлетворяет требованиям по регистрации проявлений ГДВ на морской поверхности.

Дополнительно были проведены калибровки чувствительности разработанного макета сканирующего лазерного локатора при различных величинах входного оптического потока излучения. На основе полученных данных построен график зависимости амплитуды сигнала на выходе прибора от уровня входного потока оптического излучения (рис. 3.4).



Входной поток оптического излучения, Вт

Рисунок 3.4 – Калибровочная кривая по входному потоку оптического излучения

Как видим из рисунка 3.4, полученная зависимость является линейной в области величин входного оптического потока от 10⁻¹⁰ до 10⁻²Вт. Данные значения соответствуют реальным величинам потока излучения от морской поверхности, что обеспечивает возможность работать в линейном диапазоне чувствительности приемника.

Следующий этап – натурные калибровки лазерного сканирующего локатора, и тестирование алгоритмов первичной обработки сигналов. Эти исследования проводились на специальном консольном мосту. Макет сканирующего лазерного локатора располагался над морской поверхностью на высоте 8 м (фото 3.3). Осуществлялась регистрация изменений параметров морского волнения, вызванных ГДВ от проходящих мимо судов (фото 3.4).



Фото 3.3 – Расположение макета сканирующего лазерного локатора



Фото 3.4 – Пробные гидродинамические воздействия

В процессе проведения натурных экспериментов записаны файлы при различных параметрах воздействующего гидродинамического источника.

Полученные файлы обработаны с использованием разработанного алгоритма, описанного в разделе 2.1 главы 2. Полученные матрицы гистограмм распределений информативных параметров, в данном случае рассматривались амплитуды импульсов от зеркальных бликов, представлены на рисунке 3.5 и рисунке 3.6.





На рисунке 3.5 представлена матрица гистограмм распределений информативного параметра сигнала. По оси абсцисс отложены интервалы амплитуд сигнала, по оси ординат временное смещение, а цветом отражено количество амплитуд, попадающих в соответствующий интервал значений. Справа представлена цветовая градация количества амплитуд. Слева приведена фотография волнения для различных моментов времени, в которые вычислялось распределение информативного параметра ДЛЯ зарегистрированного сигнала. В верхней части фотографии наблюдается волна Кельвина, которая образована проходящим судном, что отражается на гистограммах в виде изменения параметров распределений, а именно появляется больше импульсов с амплитудами в пределах от 0,12 до 0,16 В. На рисунке 3.6 представлена матрица гистограмм для ГДВ, вызванного другим судном. Но также в области волны следа от судна наблюдается изменение параметров распределения информативного параметра.



Рисунок 3.6 – Результаты обработки зарегистрированных сигналов при натурных испытаниях макета сканирующего лазерного локатора

Таким образом, в результате проведенных калибровок определены характеристические кривые, И подтверждена работоспособность разработанного макета сканирующего лазерного локатора для регистрации изменения параметров морской поверхности. Для зарегистрированных сигналов апробирована разработанная методика формирования гистограмм распределений информативного параметра сигнала. Как видно из рисунков 3.5 и 3.6, в области, где присутствует расходящаяся волна от движущегося судна, распределение информационного параметра меняется. Полученные данные подтверждают возможность регистрации изменения параметров морского волнения с использованием разработанного макета сканирующего лазерного локатора и алгоритмов обработка. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что макет сканирующего лазерного локатора пригоден для проведения исследований в качестве одного из каналов, в составе комплекса дистанционной оптической аппаратуры.

3.1.2. Лабораторные испытания макета двухканального фотометра яркости моря

Разработанный макет двухканального фотометра описан в разделе 2.2 главы 2. Для определения работоспособности разработанного макета были проведены калибровки и предварительные испытания. Целью испытаний является определение характеристических зависимостей разработанного макета двухканального фотометра яркости моря, провести пробную обработку сигналов, для проверки эффективности разработанных алгоритмов предварительной обработки сигналов.

Калибровка чувствительности прибора проведена на специальном стенде с использованием торированного источника излучения и набора нейтральных фильтров с известной оптической плотностью. Излучение от источника направлялось в приемный объектив макета фотометра, проходя через нейтральные фильтры, при этом проводилась регистрация оптического потока различной мощности. В результате была получена зависимость величины сигналов каждого из каналов от различной интенсивности входного потока оптического излучения (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Зависимость выходных сигналов каждого канала фотометра от

интенсивности входного оптического потока

Из рисунка 3.7 видно, что в пределах величин регистрируемых потоков оптического излучения оба канала фотометра имеют линейный характер, это позволяет проводить эффективную регистрацию.

Далее проведено исследование зависимости величины отношения каналов от различной интенсивности входного потока оптического излучения. Полученная зависимость представлена на рисунке 3.8.





Исходя из полученной зависимости (рис. 3.8) можно сделать вывод, что величина отношения сигналов зарегистрированных от лабораторного источника остается постоянной при изменении интенсивности оптического потока. Фрагмент выходных сигналов двухканального фотометра представлен на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Фрагмент выходных сигналов макета двухканального фотометра яркости моря

По полученным записям определено, что собственные шумы 50 мΒ. Следующий фотометра составляют этап предварительных испытаний – исследования зависимости величины отношения каналов сигналов из приповерхностной толщи морской среды в условиях отсутствия и наличия ГДВ, при их длительной записи в реальных условиях. Для этого макет фотометра устанавливался на консольном мосту (фото 3.5), его оптическая ось направлялась на водную поверхность под углом 53° по отношению к вертикали, и в течение 18 минут велась непрерывная регистрация. Временная развертка зарегистрированного сигнала каждого канала и величины отношения этих каналов представлена на рисунке 3.10.



Фото 3.5 – Размещение макета фотометра на консольном мосту



Рисунок 3.10 – Временная развертка зарегистрированных сигналов и их отношения для макета двухканального фотометра яркости моря

Как видно из рисунка 3.10, изменение величины отношения каналов за время регистрации составляет около 3%, что значительно меньше диапазона изменения каждого отдельного канала, которая составляет около 15%. В качестве ГДВ использовалась струя от погружного насоса с расходом 18 м³/час. При горизонтальном направлении струи, находящейся на глубине 0.2 м, отношение сигналов каналов А и В составляло 0.98±0.02 отн. ед., а при отсутствии струи 1.33±0.06 отн. ед.

В результате проведенных калибровочных исследований получены характеристические кривые для каналов спектрофотометра, исследована изменчивость величины отношения каналов для фоновых условий, но при различной освещенности солнца и его ориентации по отношению к расположению макета фотометра. Наличие ГДВ от затопленной струи приводит к изменению сигнала отношения каналов А и В на 30%, что позволяет сделать вывод о том, что разработанный макет фотометра фиксирует изменение концентрации фитопланктона при воздействии ГДВ.

Полученные данные показывают, что макет двухканального спектрофотометра пригоден для проведения исследований в составе комплекса оптической аппаратуры.

3.1.3. Лабораторные испытания макета аэрозольного лидара.

Разработанный макет аэрозольного лидара описан в разделе 2.3 главы 2, для определения работоспособности которого проведены калибровки и предварительные испытания. Цель испытаний – определить характеристические зависимости разработанного макета, провести пробную обработку сигналов, чтобы проверить эффективность разработанных алгоритмов предварительной обработки сигналов, а также чувствительность макета к регистрации проявлений ГДВ в приводном слое атмосферы.

Чувствительность разработанного прибора к различным величинам входного оптического потока проверялась на специальном стенде, схема которого представлена на рисунке 3.11.

123



Рисунок 3.11 – Схема стенда для проверки чувствительности макета аэрозольного лидара

В процессе проведения калибровки зарегистрированы сигналы при различных величинах входного оптического потока, по результатам которых построен график зависимости амплитуды сигнала от величины входного оптического потока (рис. 3.12).

Полученная зависимость является линейной во всем диапазоне регистрируемых входных потоков, что обеспечивает высокую точность при проведении измерений.



Входной оптический поток, Вт

Рисунок 3.12 – Зависимость выходного электрического сигнала макета аэрозольного лидара от величины входного потока оптического излучения

Далее были проведены натурные испытания чувствительности разработанного макета аэрозольного лидара к регистрации проявлений искусственных ГДВ в приводном слое атмосферы. В качестве источника ГДВ использовались три насоса с общей производительностью 45 м³/час. Выходные сопла насосов располагались горизонтально на глубине 0.5 м от Изменения оптических характеристик поверхности воды. аэрозоля в приводном слое атмосферы над областями воздействия искусственных ГДВ регистрировались с помощью разработанного макета аэрозольного лидара (фото 3.6).



Фото 3.6 – Размещение разработанного макета аэрозольного лидара над зоной воздействия искусственных ГДВ

В результате экспериментов получена зависимость оптических характеристик проводного слоя атмосферы в условиях наличия и отсутствия ГДВ для различных высот расположения макета над уровнем моря, которая представлены на рисунке 3.13.



Рисунок 3.13 – Усредненные высотные профили потока рассеянного излучения

 (1 – в отсутствие гидродинамического воздействия, 2 – при гидродинамическом воздействии)

Полученные результаты показывают, что разработанный макет аэрозольного лидара может регистрировать изменения оптических характеристик приводного слоя атмосферы и может быть использован в составе оптического комплекса.

3.2. Методика проведения комплексных экспериментальных исследований возможностей повышения эффективности регистрации

ГДВ

Экспериментальные исследования выполнялись в рамках комплексного эксперимента «ЮГ-2010», «ЮГ-2012» и «ЮГ-2014» и на базе 31 ИЦ ВМФ МО РФ г. Феодосия.

Объектом исследования были ГДВ создаваемые движущимся надводным судном. Регистрация ГДВ проводилась с борта судна СР-59 на полигоне 31 ИЦ ВМФ в декабре 2010 года. Задача работ заключалась в

исследовании возможностей повышения эффективности дистанционной регистрации ГДВ за счет применения комплексного подхода к регистрации проявлений гидродинамических возмущений, создаваемых движущимся надводным судном на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы в различных гидрометеоусловиях. В процессе выполнения эксперимента судно двигалось по траектории, представленной на рисунке 3.14. На рисунке 3.14 квадратами выделены участки движения, где судно пересекало свой собственный отстающий след с возрастом около 40 мин. Траектория движения судна регистрировалась посредством GPS системы.



Рисунок 3.14 – Траектория движения судна СР-59 по данным GPS

Запись сигналов осуществлялась сериями по 5 мин, что, учитывая среднюю скорость движения судна 8 узлов = 4 м/с, соответствует пройденному расстоянию 1,2 км.

Запись информационных сигналов проводились в период времени с 7:00 до 9:40 и с 10:35 до 14:05 по местному времени. Отстающий след на морской поверхности представлен на следующей фотографии.



Фото 3.7 – Фотография отстающего следа судна СР-59

На борту судна был размещен комплекс разработанной измерительной аппаратуры (рис. 3.15), состоящий из макетов сканирующего лазерного локатора (поз. 1), двухканального спектрофотометра (поз. 2) и аэрозольного лидара (поз. 3).



Рисунок 3.15 – Вид комплекса измерительной аппаратуры (а – размещение сканирующего локатора, б – размещение фотометра и аэрозольного

лидара) ци покатор размощог

Сканирующий лазерный локатор размещается на конце носового выстрела на высоте 8 м над поверхностью моря и вынесен за пределы судна

на расстояние 5 м, что обеспечивает зондирование морской поверхности в области, невозмущенной движением судна. Макет сканирующего лазерного локатора имеет герметичное исполнение, снабжен специальной стабилизирующей системой и ветрозащитным кожухом, что позволяет устранить влияние качки судна и встречного ветра на регистрируемые сигналы во время движения судна.

Макет двухканального фотометра располагается на высоте около 13 м над морской поверхностью, и его ось визирования была наклонена под углом 53° по отношению к вертикали, что обеспечивает минимальное фоновое отражение солнечного излучения в приемную систему. Пространство, с которого регистрировалось вышедшее из толщи оптическое излучение, находится на расстояние 21 м от корпуса судна, это сделано для того чтобы осуществлять регистрацию изменений концентрации фитопланктона в невозмущенной движением судна области.

Аэрозольный лидар размещался вместе с макетом фотометра на высоте 13 м над морской поверхностью. Зона измерения аэрозольного лидара была вынесена вперед за пределы корпуса судна на 25 м. Двухканальный фотометр и аэрозольный лидар размещаются на общей стабилизированной платформе, устраняющей влияние качки судна.

В процессе выполнения всего эксперимента были записаны следующие файлы.

| Аэро- | Двух- | Скани- | Название файла | Пауза, | Время | Запись, |
|---------|------------|---------|------------------|--------|-------------|---------|
| зольный | канальный | рующий | | КМ | записи | КМ |
| лидар | спектро- | локатор | | | | |
| | фототометр | | | | | |
| 1 | - | 1 | Complex_0000.dat | - | 6:52 - 6:57 | 1,129 |
| 2 | - | 2 | Complex_0001.dat | 0,446 | 6:59 - 7:04 | 1,165 |
| 3 | 1 | 3 | Complex_0002.dat | 1,149 | 7:09 - 7:14 | 1,090 |
| 4 | 2 | 4 | Complex_0003.dat | 1,670 | 7:22 - 7:27 | 1,165 |
| 5 | 3 | 5 | Complex_0004.dat | 0,427 | 7:29 – 7:34 | 1,090 |
| 6 | 4 | 6 | Complex_0005.dat | 0 | 7:34 – 7:39 | 1,270 |
| 7 | 5 | 7 | Complex_0006.dat | 1,242 | 7:44 – 7:49 | 1,238 |
| 8 | 6 | 8 | Complex_0007.dat | 1,274 | 7:54 - 7:59 | 1,276 |
| 9 | 7 | 9 | Complex_0008.dat | 0,701 | 8:02 - 8:07 | 1,315 |

Таблица 3.2. – Записанные файлы в период времени с 7:00 до 9:40

| 10 | 8 | 10 | Complex_0009.dat | 0 | 8:07 - 8:12 | 1,264 |
|----|----|----|------------------|-------|-------------|-------|
| 11 | 9 | 11 | Complex_0010.dat | 0,211 | 8:13 - 8:18 | 1,330 |
| 12 | 10 | 12 | Complex_0011.dat | 0,157 | 8:19 - 8:24 | 1,276 |
| 13 | 11 | 13 | Complex_0012.dat | 0,279 | 8:25 - 8:30 | 1,203 |
| 14 | 12 | 14 | Complex_0013.dat | 0,211 | 8:31 - 8:36 | 1,300 |
| 15 | 13 | 15 | Complex_0014.dat | 0,175 | 8:37 - 8:42 | 1,105 |
| 16 | 14 | 16 | Complex_0015.dat | 0,216 | 8:43 - 8:48 | 1,088 |
| 17 | 15 | 17 | Complex_0016.dat | 0,270 | 8:49 - 8:54 | 1,176 |
| 18 | 16 | 18 | Complex_0017.dat | 0,150 | 8:55 - 9:00 | 1,090 |
| 19 | 17 | 19 | Complex_0018.dat | 0 | 9:00 - 9:05 | 1,171 |
| 20 | 18 | 20 | Complex_0019.dat | 0,373 | 9:07 - 9:12 | 1,221 |
| 21 | 19 | 21 | Complex_0020.dat | 0,238 | 9:13 - 9:18 | 1,122 |
| 22 | 20 | 22 | Complex_0021.dat | 1,170 | 9:23 - 9:28 | 0,970 |
| 23 | 21 | | Complex_0022.dat | 0,130 | 9:29 - 9:34 | 0,376 |
| 24 | 22 | | Complex_0023.dat | 0,034 | 9:35 - 9:40 | 0,086 |

Таблица 3.3 – Записанные файлы в период времени с 10:35 до 14:05

| Аэро- | Двух- | Скани- | Название файла | Пауза, | Время записи | Запись, |
|---------|------------|---------|------------------|--------|---------------|---------|
| зольный | канальный | рующий | - | КМ | - | КМ |
| лидар | спектро- | локатор | | | | |
| - | фототометр | - | | | | |
| 1 | 1 | 1 | Complex_0024.dat | - | 10:35 - 10:40 | 1,101 |
| 2 | 2 | 2 | Complex_0025.dat | 0,619 | 10:43 - 10:48 | 0,859 |
| 3 | 3 | 3 | Complex_0026.dat | 0,102 | 10:49 - 10:54 | 0,659 |
| 4 | 4 | 4 | Complex_0027.dat | 0 | 10:54 - 10:59 | 0,978 |
| 5 | 5 | 5 | Complex_0028.dat | 0,245 | 11:00 - 11:05 | 1,047 |
| 6 | 6 | 6 | Complex_0029.dat | 0,208 | 11:06 - 11:11 | 1,096 |
| 7 | 7 | 7 | Complex_0030.dat | 0,847 | 11:15 - 11:20 | 1,343 |
| 8 | 8 | 8 | Complex_0031.dat | 0 | 11:20 - 11:25 | 1,308 |
| 9 | 9 | 9 | Complex_0032.dat | 0,495 | 11:27 - 11:32 | 1,365 |
| 10 | 10 | 10 | Complex_0033.dat | 2,334 | 11:41 - 11:46 | 1,322 |
| 11 | 11 | 11 | Complex_0034.dat | 0,245 | 11:47 - 11:52 | 1,353 |
| 12 | 12 | 12 | Complex_0035.dat | 4,524 | 12:10 - 12:15 | 1,122 |
| 13 | 13 | 13 | Complex_0036.dat | 0 | 12:15 - 12:20 | 1,066 |
| 14 | 14 | 14 | Complex_0037.dat | 0,23 | 12:21 - 12:26 | 1,139 |
| 15 | 15 | 15 | Complex_0038.dat | 0 | 12:26 - 12:31 | 1,036 |
| 16 | 16 | 16 | Complex_0039.dat | 0,238 | 12:32 - 12:37 | 1,223 |
| 17 | 17 | 17 | Complex_0040.dat | 0 | 12:37 - 12:42 | 1,188 |
| 18 | 18 | 18 | Complex_0041.dat | 0,271 | 12:43 - 12:48 | 1,222 |
| 19 | 19 | 19 | Complex_0042.dat | 0 | 12:48 - 12:53 | 1,29 |
| 20 | 20 | 20 | Complex_0043.dat | 0,204 | 12:54 - 12:59 | 1,221 |
| 21 | 21 | 21 | Complex_0044.dat | 0 | 12:59 - 13:04 | 0,911 |
| 22 | 22 | 22 | Complex_0045.dat | 1,286 | 13:10 - 13:15 | 1,21 |
| 23 | 23 | 23 | Complex_0046.dat | 0,215 | 13:16 - 13:21 | 1,111 |
| 24 | 24 | 24 | Complex_0047.dat | 0,255 | 13:22 - 13:27 | 1,102 |
| 25 | 25 | 25 | Complex_0048.dat | 0 | 13:27 - 13:32 | 1,136 |
| 26 | 26 | 26 | Complex_0049.dat | 0 | 13:32 - 13:37 | 1,081 |
| 27 | 27 | 27 | Complex_0050.dat | 0,243 | 13:38 - 13:43 | 0,865 |
| 28 | 28 | 28 | Complex_0051.dat | 0,696 | 13:56 - 14:01 | 1,145 |

| 29 | 29 | 29 | Complex_0052.dat | 0,651 | 14:04 - 14:09 | 1,187 |
|----|----|----|------------------|-------|---------------|-------|

Таким образом, в результате эксперимента записано 52 файла исходных информационных сигналов общим объемом 3,5 Гб.

При обработке результатов экспериментальных исследований, особый интерес представляют сигналы, зарегистрированные в моменты пересечений собственного отстающего следа судна. На рисунке 3.16 представлены схемы маневрирования судна при каждом пересечении отстающего следа, а также участки, обозначенные временем, где осуществлялась регистрация информационных сигналов. Направление ветра согласно выписке ИЗ судового журнала в моменты пересечения отстающего следа было различным.



Рисунок 3.16 – Схемы маневрирования судна в процессе выполнения экспериментов

Дополнительно проводились измерения метеоданных и гидрологии в зоне выполнения исследований. Измеренные метеоданные приведены в таблице 3.14.

| Температура воздуха, °С | 12 |
|---------------------------------|-----------|
| Атмосферное давление, мм. р.ст. | 759 |
| Метеорологическая дальность | 20 |
| видимости, км | |
| Скорость ветра, м/с | 1 — 2 м/с |
| Облачность, балл | 9 |

Таблица 3.14 – Метеоданные при проведении экспериментов

Направление ветра и его скорость менялись в процессе проведения эксперимента с южного на северный. Это говорит о том, что метеоусловия меняются для различных экспериментов. Измерения гидрологии проводилось в двух точках со временем 5:22 и 9:36 соответственно. По результатам измерений гидрологии был сделан вывод, что гидрологические условия не меняются.

Исходя из теоретических оценок для параметров измеренной гидрологии, при возрасте отстающего следа около 40 мин, его поперечный размер составит несколько сотен метров.

3.3. Натурные комплексные исследования эффективности регистрации ГДИ в разных метеоусловиях.

В предыдущем разделе была описана методика проведения комплексного эксперимента. Все полученные исходные данные были разделены на две серии записей по времени: серия 1 с 7:00 до 9:35 и серия 2 с 10:35 до 14:05. В данном разделе рассмотрим подготовку сигналов и комплексную обработку полученных данных.

Вся обработка проводилась по алгоритмам, описанным в главе 2, для каждого метода регистрации параметров морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приводного слоя атмосферы. Все алгоритмы были реализованы в среде программирования и обработки данных Matlab в виде отдельных модульных функций. Такой способ реализации

алгоритмов позволяет проводить дополнительный контроль при проведении обработки на промежуточных стадиях.

Исходные данные двухканального спектрофотометра после процедуры синхронного накопления (время накопления 5 с) представлены на рисунках 3.17 и 3.18 для двух серий записей соответственно. Зависимость величины отношения каналов спектрофотометра от времени представлена на рисунках 3.19 и 3.20.



Рисунок 3.17. – Накопленные сигналы с каналов спектрофотометра (серия 1)



Рисунок 3.18. – Накопленные сигналы с каналов спектрофотометра (серия 2)

Видим, что в процессе работы интенсивность регистрируемого излучения каждым каналом увеличивается во время первой серии, что связано с восходом Солнца. На второй серии уровни каналов не меняются.



Рисунок 3.19 – Зависимость величины отношения каналов спектрофотометра от времени (серия 1)





На рисунках 3.17 – 3.20 цветом отмечены места, где происходило пересечение отстающего следа судна.

обработаны аэрозольного лидара были процедурой Данные с синхронного накопления (время накопления 30 с), полученные результаты рисунках 3.21 3.22 серий записей представлены И для двух на соответственно.









аэрозольного лидара (серия 2)

Данные макета сканирующего лазерного локатора после пороговой фильтрации приведены на рисунках 3.23 и 3.24.



Рисунок 3.23 – Сигнал сканирующего локатора после пороговой фильтрации

(серия 1)





Как видно из рисунков 3.21 – 3.24, анализ исходных сигналов с целью выявления наличия аномалий, вызванных воздействием ГДИ в виде турбулентного следа затруднителен, даже в условиях априорно известной зоны проявления ГДВ от турбулентного следа. На этих участках информационные сигналы не имеют четко выраженных признаков наличия аномалий от ГДВ.

Теперь проведем обработку информационных сигналов каждого прибора с целью получения информативных признаков сигналов согласно разработанному алгоритму. Для сканирующего локатора будем строить распределения по амплитудам импульсов, для двухканального фотометра – по интервалам времени между узловыми точками сигнала отношения каналов, для аэрозольного лидара – по амплитудам сигнала. Для наглядного представления разделим весь объем информации на массивы, которые соответствуют первому и второму пересечению отстающего следа. Маршрут движения время первого пересечения судна BO отстающего следа, размеченный по времени и по номерам записанных файлов, представлен на рисунке 3.25.

137



Рисунок 3.25 – Разметка первого пересечения отстающего следа надводного судна

(зелеными цифрами отмечены номера файлов, записанных сигналов с фотометра, а синими – с аэрозольного лидара, вдоль траектории движения судна указано текущее местное время)

Так как эксперимент проводился в условиях контролируемых ГДИ, то для обработки представляют интерес файлы с номерами 17,18 по фотометру и 19, 20 по аэрозолю, когда судно пересекало свой след с возрастом 40 мин. В качестве фонового сигнала возьмем файлы исходных сигнальных записей под номерами 14 – 16, 18 – 21 для двухканального спектрофотометра и 16 – 18, 20 – 23 для аэрозольного лидара и для сканирующего локатора.

Сигналы с фотометра обрабатывались при различном времени накопления 2, 5 и 20 с. Такие времена накопления соответствуют пространственным масштабам 8, 20 и 80 м. Для времени накопления 5 с графики зависимости сигналов по каналам А (440 нм) и В (540 нм) фотометра представлены на рисунке 3.26, на рисунке 3.27 – зависимость отношения каналов А и В макета двухканального фотометра, а на рисунке 3.28 – разность каналов (В – А).



Рисунок 3.26. – Временная зависимость нормированных значений сигналов по каналам A и B макета фотометра в области первого пересечения

отстающего следа надводного судна



Рисунок 3.27. – Временная зависимость отношения каналов А и В макета фотометра в области первого пересечения отстающего следа надводного



Рисунок 3.28. – Временная зависимость разности каналов А и В макета фотометра в области первого пересечения отстающего следа надводного

судна.

На рисунках 3.26 – 3.28 и всех последующих синими линиями выделен участок, в котором ожидается проявление турбулентной части отстающего следа. Как видно, в этой области происходит регуляризация периода осцилляций зависимости отношения каналов А и В макета фотометра, что свидетельствует о возможном проявлении турбулентного следа. Для выделения информации о наличии в сигнале изменений, связанных с турбулентной частью следа, устраним низкочастотный (НЧ) тренд в сигнале отношения А/В, обусловленный крупномасштабным пятнистым характером фонового распределения фитопланктона, который может составлять масштабы нескольких км. Графики НЧ составляющей и ВЧ составляющей отношения А/В после устранения тренда приведены на рисунке 3.29 и рисунке 3.30. Низкочастотная фильтрация произведена с шириной окна фильтра 60 сек. Дальнейшая обработка заключается в определении частоты перехода полученной кривой через ноль на заданных интервалах. Для этого ВЧ составляющая отношения А/В разбита на 12 участков, каждый из

которых отвечает временному интервалу 25 с. Для каждого интервала рассчитано число нулей ВЧ составляющей отношения А/В, и построена соответствующая гистограмма (рис. 3.31).



Рисунок 3.29 – НЧ составляющая отношения каналов А и В макета фотометра в области первого пересечения отстающего следа надводного

судна



Рисунок 3.30 – ВЧ составляющая отношения каналов А и В макета фотометра в области первого пересечения отстающего следа надводного

судна



Рисунок 3.31 – Гистограмма распределения значений периодов отношения каналов А и В макета фотометра на заданном интервале времени, в области

первого пересечения отстающего следа надводного судна.

По сигналам с аэрозольного лидара построены амплитудные распределения в различные моменты времени. Результаты обработки сигналов аэрозольного лидара приведены на рисунке 3.32



Рисунок 3.32 – Гистограмма амплитудного распределения сигнала аэрозольного локатора.

По сигналам сканирующего локатора построены амплитудные распределения сигнала, которые приведены на рисунке 3.33.



Рисунок 3.33 – Пример амплитудной гистограммы для сигналов сканирующего локатора

По полученным распределениям определим информативные признаки для каждой гистограммы, причем будем использовать среднее значение распределения. Полученные наборы информативных признаков изменений для сигналов каждого метода приведены на рисунке 3.34.



Рисунок 3.34 – Графики временных зависимостей параметров регистрируемых сигналов при первом пересечении отстающего следа

Сплошной линией представлена зависимость параметра изменения сигнала лазерного сканирующего локатора, определяемого средним значением числа зеркальных бликов на морской поверхности. Пунктирной линией обозначена временная зависимость параметра изменения сигнала двухканального спектрофотометра в виде среднего периода осцилляций A/B. определяемого отношения каналов частотой изменений приповерхностной концентрации фитопланктона относительно среднего значения. Штрих пунктирной линией отмечена временная изменчивость параметра изменения сигнала аэрозольного лидара, определяемого концентрации приводного аэрозоля. Данные изменением реализации сигналов приведены за время 20 мин, что, с учетом скорости движения судна, составляет 4,8 км проеденного расстояния.

Теперь рассмотрим область второго пересечения отстающего следа. На рисунке 3.35 представлен маршрут судна. На траекторию движения наложена разметка по времени и по номерам записанных файлов.



Рисунок 3.35 – Разметка второго пересечения отстающего следа судна (синими цифрами отмечены номера файлов, записанных сигналов с фотометра и аэрозольного лидара). Вдоль разметки указано текущее местное время.

Для обработки интерес представляют файлы с номерами 16 и 17, отвечающие предполагаемой зоне турбулентного следа. Файлы фоновых
записей возьмем вблизи пересечения 12 – 15 и 18 – 21. Данные фотометра обрабатывались аналогично обработке при первом пересечении следа судна, при времени осреднения сигнала 2 с.

Сигналы с аэрозольного лидара были обработаны по процедуре синхронного накопления со временем накопления 60 с. Результаты обработки сигналов аэрозольного лидара, наложенные на результаты обработки сигналов фотометра и сканирующего локатора, приведены на рисунке 3.36.



Рисунок 3.36 – Графики временных зависимостей параметров регистрируемых сигналов при втором пересечении отстающего следа

Полученные зависимости параметра изменчивости для каждого канала теперь необходимо свести к единой оценочной функции, применяя комплексный алгоритм.

Исходя из метеоусловий, которые были в момент проведения экспериментов назначим коэффициенты комплексирования следующими:

*M*₁ = 0,5 – коэффициент комплексирования для сигналов сканирующего локатора.

M₂ = 0,2 – коэффициент комплексирования для сигналов аэрозольного лидара.

145

*M*₃ = 0,7 – коэффициент комплексирования для сигналов
 двухканального спектрофотометра.

В результате комплексирования получаем единую оценочную функцию (рис. 3.37, 3.38).



Рисунок 3.37 – Комплексная оценочная функция для первого пересечения

отстающего следа судна



Рисунок 3.37 – Комплексная оценочная функция для второго пересечения

отстающего следа судна

Если в качестве порога выбрать значение на уровне дисперсии полученной комплексной оценки, то, как видно из рисунка 3.37 полученная оценочная функция имеет ярко выраженный минимум в области пересечения отстающего следа.

Таким образом, применяя комплексный подход к регистрации ГДВ для данных метеоусловий удается достичь существенного повышения эффективности регистрации поверхностного следа судна. Так, по сравнению с методом регистрации проявлений таких ГДВ в приводном слое атмосферы использование комплекса аппаратуры позволило повысить эффективность регистрации на 25%.

Выводы к главе

В результате проведения предварительных испытаний было показано, что разработанные макеты могут регистрировать изменения параметров морской поверхности, приповерхностного слоя морской среды и приводного слоя атмосферы.

Был проведен натурный эксперимент по регистрации проявлений ГДВ в виде отстающего следа надводного судна на морской поверхности, в приповерхностном слое моря и приводном слое атмосферы. В результате проведенного эксперимента показана возможность повышения эффективности дистанционной оптической регистрации ГДВ за счет использования комплексного подхода при различных метеоусловиях.

выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Разработана методика комплексирования дистанционных методов регистрации проявлений ГДИ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы.

 На основе выбранных методов оптической регистрации разработаны и созданы экспериментальные макеты оптической аппаратуры, позволяющие осуществлять комплексный мониторинг параметров морской поверхности, приводного слоя атмосферы и приповерхностного слоя морской среды с борта судна.

3. Впервые исследован эффект изменения светорассеяния в приводном слое атмосферы, с использованием разработанного комплекса оптической аппаратуры, при воздействии подводного гидродинамического источника. Полученные результаты подтверждают возможность косвенной регистрации ГДВ по их проявлениям в приводном слое атмосферы.

4. Разработан и реализован алгоритм предварительной подготовки сигналов, регистрируемых оптической аппаратурой и их комплексирования. В алгоритме реализовано управление параметрами каждого канала комплекса оптической аппаратуры, что позволяет оптимальным образом осуществлять регистрацию проявлений ГДВ в различных метеоусловиях.

5. Экспериментально показана возможность повышения эффективности дистанционной оптической регистрации ГДВ за счет использования комплексного подхода в различных метеоусловиях.

6. Разработанная в рамках диссертационного исследования методика комплексной оптической регистрации и алгоритмы обработки информационных сигналов, позволяют повысить эффективность регистрации проявлений ГДВ на 20-25% в различных гидро-метеоусловиях по сравнению с эффективностью регистрации только одним из методов.

148

7. Разработанные методики и технические решения реализованы и внедрены:

- в макете комплексной системы мониторинга и регистрации проявлений ГДИ, разработанной в ГЕОХИ РАН;

- в макете системы регистрации ГДВ от искусственных ГДИ на морской поверхности, приповерхностном слое морской среды и приводном слое атмосферы, разработанном в 31 Исследовательский центр МО РФ совместно с ГЕОХИ РАН в рамках научных тем: ОКР «Орел» и СЧ НИР «Богучарец-3».

- оригинальность и новизна предложенных оптических методов подтверждена патентом РФ № 2014126498.

8. Результаты работы докладывались на пяти конференциях, в том числе трех международных, и опубликованы в 16 публикациях, в том числе 4 статьи опубликованы в центральных научно-технических журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. А.С. Монин, В.П. Краситский. Явления на поверхности океана. Гидрометеоиздат 1985, 336 с.
- 2. К. Я. Кондратьев, Н. И. Москаленко, Д. В. Поздняков Атмосферный аэрозоль, Л.: Гидрометеоиздат, 1983г., 224с.
- Б.Ф. Кельбалиханов. Гидрооптические исследования в водах Мирового океана– Сыктывкар, 1992. – 126 с.
- Статистические характеристики ветрового волнения в гравитационнокапиллярной области спектра / Носов В.Н., Пашин С.Ю. // Изв. Ан. СССР. Физ. атм. и океана, – 1990. – Т. 26. – №11. – С. 1161–1169.
- Райст П. Аэрозоли. Введение в теорию. Пер. с англ. –М.: Мир, 1987г., 280с.
- W.G.N. Slinn, P.S. Liss Air-Sea Exchange of Gases and Particles, 1983, Springer, 576c.
- Рассеяние лазерного излучения над морской поверхностью при наличии гидродинамических возмущений в толще водной среды / Носов В.Н., Горелов А.М., Каледин С.Б., Кузнецов В.А., Леонов С.О., Савин А.С. // ДАН, – 2010. – Т. 433. – №1. – С. 111–112.
- Метод обнаружения нелинейных явлений в океане от движущихся подводных объектов и их теоретическое объяснение / Р.Н. Алифанов, П.А. Стародубцев, В.И. Трасковский, А.Г. Сенченко, В.А. Щепетильников // Журнал Сибирского Федерального университета. -2010. - Т. 3. -№2.-С. 131-139.
- Гидродинамические возмущения морской среды от подводных объектов и измерение их характеристик просветными гидроакустическими системами / В. И. Трасковский, В. В. Харина, М. В. Мироненко, П.А. Стародубцев// Известия вузов. Северо-кавказский регион. Технические науки. -2010. - №6. –С.124-137.

- Взаимодействие волн различной физической природы в морской воде/ М.В. Мироненко [и др.]//Подводные технологии 2000: сб. тр. международ. симп. 23-26 мая 2000г., Япония, Токио. С. 105 -110.
- M. Mercier, R. Vasseur, T. Dauxois Resurrecting dead-water phenomenon// Nonlin. Processes Geophys.18, pp.193-208, 2011.
- C. Walter, G. Philippe, S. Catherine Coupling between internal and surface waves// J Natural Hazards, v.57(3), pp. 617-642, 2011.
- Craig W, Guyenne P, Sulem C (2010) A Hamiltonian approach to nonlinear modulation of surface water waves. Wave Motion.
- V. N. Kudryavtsev Interaction between the surface and internal waves: the modulation and master mechanisms// Phys. Oceanogr., 4(5), pp. 357-375, 1993.
- Hughes B. A. The effect of internal waves on surface wind waves 2. Theoretical analysis// J. Geophys. Res., 83(c1), pp. 455-465, 1978
- Paul A. Hwang, Observations of swell influence on ocean surface roughness, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 2008, 113, C12
- Victor V. Bakhanov, Lev A. Ostrovsky, Action of strong internal solitary waves on surface waves, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978– 2012), 2002, 107, C10
- F. J. Resch, J. S. Darrozes, G. M. Afeti, Marine liquid aerosol production from bursting of air bubbles, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1986, 91, C1019-1029
- Donald E. Spiel, The number and size of jet drops produced by air bubbles bursting on a fresh water surface, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1994, 99, C5
- P. G. Mestayer, A. M. J. Van Eijk, G. De Leeuw, B. Tranchant, Numerical simulation of the dynamics of sea spray over the waves, Journal of Geophysical Research, 1996, 101, C9, 20771-20797.

- N. A. Mishchuk, V. V. Goncharuk, Generation and dynamics of aerosols over water surface, Journal of Water Chemistry and Technology, 33, 2, 73, 2011.
- 22. R. H. J. Grimshaw and K. R. Khusnutdinova The effect of bubbles on internal waves. J. Phys. Oceanogr., 34, 477–489, 2004.
- 23. S. A. Thorpe on the clouds of bubles formed be breaking wind-waves in deep water and their role in air-sea gas transfer, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 304, 155, 1982.
- 24. Mason B.J. Bursting of air bubbles of the surface of sea water Nature 174, 470 471, 1954.
- Ермаков С.А., Капустин И.А. Экспериментальное исследование расширения турбулентного следа надводного судна. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 4. с. 565-570.
- 26. R.H.J. Grimshaw, K.R. Khusnutdinova, Internal waves in a three-layer bubbly waveguide, Deep-Sea Research II 51 (2004) 2905-2917.
- R.H.J. Grimshaw, K.R. Khusnutdinova, L.A. Ostrovsky, The effect of a depth-dependent bubble distribution on the normal modes of internal waves: quasistatic approximaton, European Journal of Mechanics B/Fluids 27 (2008) 24-41.
- Grimshaw, R. H. J., K. R. Khusnutdinova, L. A. Ostrovsky, and A. S. Topolnikov Structure formation in the oceanic subsurface bubble layer by an internal wave field, Phys. Fluids, 22, 106603, 2010.
- 29. S. A. Thorpe, "A model of the turbulent diffusion of bubbles below the sea surface," J. Phys. Oceanogr. 14, 841 (1984).
- Magalhaes J. M. et al. On the detectability of internal waves by an imaging lidar, Geophysical Research Letters, Geophysical Research Letters, 40(13), 3429-3434, 2013.
- Arin, L., C. Marrase, M. Maar, F. Peters, M. M. Sala, and M. Alcaraz. 2002.
 Combined effects of nutrients and small-scale turbu-lence in a microcosm

experiment. I. Dynamics and size distri-bution of osmotrophic plankton. Aquat. Microb. Ecol.29: 51 – 61

- 32. Peters, F., L. Arin, C. Marrase, E. Berdalet, and M. M. Sala. 2006. Effects of small-scale turbulence on the growth of two diatoms of different size in a phosphorous-limited medium. J. Mar. Syst.61: 134 – 148.
- 33. Kiorboe, T., H. Ploug, and U. H. Thygesen. 2001. Fluid motion and solute distribution around sinking aggregates. I. Small-scale fluxes and heterogeneity of nutrients in the pelagic environ-ment. Mar. Ecol. Prog. Ser. 211: 1 13.
- Karp-Boss, L., E. Boss, and P. A. Jumars. 1996. Nutrient fluxes to planktonic osmotrophs in the presence of fluid motion. Oceanogr. Mar. Biol.34: 71 – 107.
- 35. Jennifer C. Prairie, Kelly R. Sutherland, Kerry J. Nickols, AmandaM. Kaltenberg Biophysical interactions in the plankton: A cross-scale review //Limnology and Oceanography: Fluids and Environments† 2 (2012): 121–145
- 36. Thorpe, S. A. 2005. The Turbulent Ocean. Cambridge Univ. Press
- Musielak, M. M., L. Karp-Boss, P. A. Jumars, and L. J. Fauci. 2009. Nutrient transport and acquisition by diatom chains in a moving fluid. J. Fluid Mech.638: 401 – 421.
- Fahnenstiel, G. L., D. Scavia, G.A. Lang, J. H.Saylor, G.S. Miller, D. J. Schwab. 1988. Impact of inertial period internal waves on fixed-depth primary production estimates. J. Plankton Res.10:77–87.
- 39. Webb, W. L., M. Newton, D. STARR. 1974. Carbon-dioxide exchange of Alnus-rubra—mathematical model. Oecologia №17, 281–291.
- M. A. Evans, S. MacIntyre, G. W. Kling Internal wave effects on photosynthesis: Experiments, theory, and modeling Limnol. Oceanogr.,53(1), 2008, 339–353.
- Б.Ф. Кельбалиханов. Гидрооптические исследования в водах Мирового океана. Сыктывкар, 1992, 126 с.

- 42. Г.С. Карабашев, М.А. Евдошенко, С.В. Шеберстов. Анализ проявлений мезомастабного водообмена на спутниковых снимках морской поверхности. // Океанология, 2005, т.45, №2, с.182-192.
- 43. Дистанционное зондирование в метеорологии, океанографии и гидрологии. Под ред. А.П. Крэкнелла. М.: Мир, 1984. 535 с.
- Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов, Новосибирск: Наука, 1979.
- 45. В.М. Орлов, И. В. Самохвалов, М. Л. Белов и др. Дистанционный контроль верхнего слоя океана Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ие, 149с., 1991.
- 46. Носов В.Н., Зосимов В.В. Оптический метод исследования временных параметров волнения на свободной поверхности жидкости\\Вопросы судостроения. Сер.: Акустика.-1983.-Вып.17-С.28-32.
- 47. Носов В.Н., Пашин С.Ю., Симановский Я.О. Оптическая регистрация гидродинамических возмущений поверхностного волнения \\ Вопросы судостроения. Сер.: Акустика.-1983.-Вып.17-С.32-38.
- Носов В.Н. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Фонды ГЕОХИ РАН, инв. № 5925. – М.
- 49. Носов В.Н., Пашин С.Ю., Горелов, А.М., Каледин С.Б., Ильичев А.Т. «Об использовании зеркально-бликовых отражений для дистанционной регистрации параметров морского волнения». Материалы третьей Всероссийской конференции «Взаимодействие подводных возмущений с поверхностными волнами (гидродинамическая основа радиотомографии)», Институт проблем механики РАН, Москва, 2004 г., с.10-12
- 50. Носов В.Н., Горелов А.М., Каледин С.Б. «Современное состояние и проблемы метода зондирования взволнованной морской поверхности Материалы Всероссийской лазерным пучком». третьей узким конференции «Взаимодействие подводных возмущений с поверхностными (гидродинамическая волнами основа

радиотомографии)», Институт проблем механики РАН, Москва, 2004 г., с.15-18.

- 51. Носов В.Н., Бояринцева Т.Е., Горелов А.М., Ильичев А.Т., Кузнецов В.А., Каледин С.Б., Подгребенков А.Л., Савин А.С. «Исследование характеристик взволнованной морской поверхности и их изменчивости методом дистанционного лазерного зондирования». Тезисы докладов Второй межведомственной конференции «Проявление глубинных процессов на морской поверхности», Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2005 г., с. 18.
- 52. Носов В.Н., Бояринцева Т.Е., Горелов А.М., Ильичев А.Т., Кузнецов В.А., Каледин С.Б., Подгребенков А.Л., Савин А.С. «О возможности применения растрового метода для регистрации динамических характеристик морской поверхности». Тезисы докладов Второй межведомственной конференции «Проявление глубинных процессов на морской поверхности», Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2005 г., с. 19.
- C. Cox, W. Munk Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter, J. Opt. Soc. Am, V. 44, N. 11, 1954, p. 838-850.
- 54. Кравцов Ю.А. Нерезонансный механизм рассеяния электромагнитных волн на морской поверхности: рассеяние на крутых заостренных волнах / Ю.А. Кравцов, М.И. Митягин, Л.Н. Чурюмов // Изв. Вузов. Сер. Радиофизика. – 1999. – Т. 42. – № 3. – С. 240 - 254.
- 55. Valenzuela G. Theories for the interaction of electromagnetic and ocean waves: A Review// Boundary Layer Meteorology. 1978. V. 13. -№ 1 4.
 P. 61 85.
- 56. V.N. Nosov, A.M. Gorelov, S.B. Kaledin, S.O. Leonov, V.A. Kusnetsov «Optoelectronic device for research dynamics characteristics of smoothrefined structure wave sea surface»// Abstracts to Young Optical Scientist Conference, Moscow, BMSTU, 2009.

- 57. Носов В.Н., Бояринцева Т.Е., Бринев В.М., Горелов А.М., Карабутов А.М., Каледин С.Б., Подгребенков А.Л., Савин А.С., Северцев Н.А. «Растровый метод оценки распределения скоростей зеркальных бликов, отраженных от взволнованной морской поверхности». Материалы Второй межведомственной конференции «Проявление глубинных процессов на морской поверхности», Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2007 г., с. 144-152.
- 58. О.И. Абрамов, В.И. Еремин, Γ.Γ. Лобов, B.B. Половинко «Исследование поверхностного слоя морской воды методами неконтактного лазерного зондирования». - В кн. «Оптика моря», М.: Наука, 1983г., с 178 – 182.
- D. Hauser, E. Soussi, E. Thouvenot, L. Rey, 2001: Swimsat: a real-aperture radar to measure directional spectra of ocean waves from space—main characteristics and performance simulation. J. Atmos. Oceanic Technol., 18, 421–437.
- Есипов И.Б., Наугольных К.А., Носов В.Н., Пашин С.Ю. Измерение вероятностного распределения радиусов кривизны морской поверхности \\ Изв. АН СССР. Физ. атм. и океана. – 1986. – Т.22, № 10 – С.1115-1117.
- V. Yu Karaev, M. B. Kanevsky, G. N. Balandina, P. Challenor, C. Gommenginger, M. Srokosz. (2010) The Concept of a Microwave Radar with an Asymmetric Knifelike Beam for the Remote Sensing of Ocean Waves. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 22:11, 1809-1820.
- В.Н. Носов, А.М. Горелов, С.Б. Каледин, А.С.Савин, С.О. Леонов Корреляционно -матричный метод обработки результатов лазерного сканирования морской поверхности//Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Приборостроение", 2011г., №3, с. 26 - 33, ISBN 0236-3933
- 63. А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной, В.Г. Кривошея, Н.П. Незлин, Д.М. Соловьёв, С.В. Станичный, В.Г. Якубенко. Особенности динамики вод

и распределения хлорофилла «а» в Сверно-Восточной части Чёрного моря осенью 1997г. // Океанология, 2000, т.40, №3, с.344-356.

- 64. М.Е.Ли, О.В.Мартынов Некоторые результаты исследований индекса цвета в море// Морские гидрофизические исследования №1 (72), 1976. Изд. МГИ АН УССР, Севастополь, с.133-138.
- 65. В.И.Дегтярев, О.Г.Константинов, А.А.Нелепа, И.П.Костенко Дифференциальный измеритель коэффициента спектральной яркости поверхности моря // Морские гидрофизические исследования №1 (72), 1976г. Изд. МГИ АН УССР, г. Севастополь, с.124-132.
- 66. И.Д.Ефименко, В.С.Новиков, В.Н.Пелевин Авиационный регистрирующий фотометр яркости поверхности моря// В сб. Световые поля в океане. Москва, Институт океанологии АН СССР, 1979г.,с.203-210.
- 67. Применение фотометра яркости для получения информации о наличие гидродинамических возмущений в морской среде / С.Г. Иванов, В.Н. Носов, В.И. Погонин, Е.А. Зевакин, А.С. Савин, А.М. Горелов, С.О. Леонов. // Труды международной конференции "Актуальные направления развития прикладной математики в энергетике, энергоэффективности и информационно-коммуникационных технологиях" Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2010. – С. 277–281.
- 68. С.Г. Иванов, В.Н. Носов, В.И. Погонин, С.О. Леонов, В.А. Кузнецов, А.С. Савин, Е.А. Зевакин «Использование двухканального фотометра для регистрации гидродинамических явлений»// Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 4-й Международной научно-технической конференции/ Российской НТОРЭС им. А.С. Попова – Суздаль, Россия: Изд-во ООО «Информпресс-94», 2011 г., с. 96 – 98
- E. C. Morgan, I.O. Muircheartaigh Optimal power-law description of oceanic whitecap coverage dependence on wind speed, J. Phys. Oceanology, 10, 2094, 1980

- S. A. Thorpe on the clouds of bubles formed be breaking wind-waves in deep water and their role in air-sea gas transfer, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 304, 155, 1982.
- 71. Mason B.J. Bursting of air bubbles of the surface of sea water Nature 174, 470 471, 1954.
- N. A. Mishchuk, V. V. Goncharuk, Generation and dynamics of aerosols over water surface, Journal of Water Chemistry and Technology, 33, 2, 73, 2011
- 73. Креков Г.М., Рахимов Р.Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. Новосибирск: Наука, 1982.
- F. J. Resch, J. S. Darrozes, G. M. Afeti, Marine liquid aerosol production from bursting of air bubbles, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1986, 91, C1019-1029
- 75. Donald E. Spiel, The number and size of jet drops produced by air bubbles bursting on a fresh water surface, Journal of Geophysical Research: Oceans (1978–2012), 1994, 99, C5
- 76. P. G. Mestayer, A. M. J. Van Eijk, G. De Leeuw, B. Tranchant, Numerical simulation of the dynamics of sea spray over the waves, Journal of Geophysical Research, 1996, 101, C9, 20771-20797
- 77. Piskozub J. Study of spatial distribution of marine aerosol over sea coast with a multifrequency lidar system// Proc. SPIE vol. 2471, 1995, p. 387-389.
- Zielinski A., Piskozub J., Irczuk M. Lidar studies of marine aerosol in the coastal zone// Proc. SPIE vol. 2471, 1995, p. 428-438.
- Оптико-электронные методы изучения аэрозолей / С.П. Беляев, Н.К. Никифоров, В.В. Смирнов, Г.И. Щелчков – М.:Энергоиздат, 1981. -232c.
- В. И. Козинцев, В. М. Орлов, М. Л. Белов и др. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана,528с., 2002.

- 81. R. Signorell, J. P. Reid Fundamentals and Applications in Aerosol Spectroscopy, CRC Press, 509p., 2011.
- 82. Рассеяние лазерного излучения над морской поверхностью при наличии гидродинамических возмущений в толще водной среды / Леонов С.О. [и др.] // ДАН, – 2010. – Т. 433. – №1. – С. 111–112.
- 83. В. Н. Носов, С. Б. Каледин, А. М. Горелов, С. О. Леонов, В. А. Кузнецов, В.И. Погонин, А. С. Савин «Особенности светорассеяния в приводном слое атмосферы над областями долгоживущих гидродинамических возмущений морской среды» // Доклады Академии наук, Академиздатцентр "Наука" РАН, т. 442, №4, 2012г., стр. 549 550.
- 84. Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х., Ярлыков М.С. Комплексные системы радиоавтоматики. М. «Сов. Радио», 1968, 232 с.
- А. И. Кухтенко Проблема инвариантности в автоматике. Госметхиздат, УССР, Киев, 1963г.
- 86. В. А. Бесекерский, А. А. Елисеев, А. В. Небылов и др. Радиоавтоматика: Учеб. пособие для студ. вузов спец. Р15 "Радиотехника". - М.: Высш. шк., 271с., 1985г.
- А. М. Якубович Оптимальное комплексирование приборов с различными диапазонами измерений. - "Автометрия", №4, 1973.
- М. П. Бобнев, Б. Х. Кривицкий, М. С. Ярлыков Комплексные системы радиоавтоматики. М., "Сов. радио", 1968, 232с.
- Толкаченко Г.А., Худяков Ю.А., Комплексирование гидрофизических измерительных приборов. – В. кн.: Морские гидрофизические исследования, № 3 (70), Севастополь, МГИ АН УССР, 1975.
- 90. Ю. А. Худяков Повышение эффективности неконтактных измерений гидрофизических полей методом комплексирования измерительных проеобразователей Морские гидрофизические исследования, № 3 (70), Севастополь, МГИ АН УССР, 1975.

91. Твердотельный лазер среднего ИК-диапазона с накачкой диодной линейкой / С.О. Леонов [и др.]: пат. RU 148558 Рос. Федерация. № 2014126498/28; заявл. 30.06.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34.