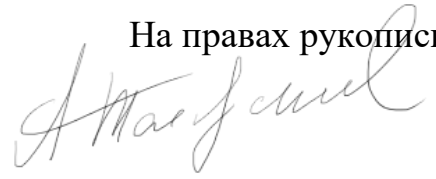


На правах рукописи



МАЕВСКИЙ
Андрей Михайлович

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОГО
ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ БЕЗЭКИПАЖНЫХ МОРСКИХ
ТРАНСПОРТНЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫХ
ЗАДАЧ**

2.5.17 – Теория корабля и строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» на кафедре прикладной математики и математического моделирования.

Научный руководитель : **Никущенко Дмитрий Владимирович**
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры прикладной математики и
математического моделирования, СПбГМТУ,
г. Санкт-Петербург

Официальные
оппоненты: **Мартынова Любовь Александровна**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ведущий научный сотрудник
Государственный научный центр Российской
Федерации АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ
«ЭЛЕКТРОПРИБОР»

Казунин Дмитрий Владимирович
доктор технических наук, доцент, Директор
департамента МАНС ООО «Стеор –
Навигационные системы будущего»

Ведущая организация: АО «Концерн «НПО» Аврора», г. Санкт-Петербург

Защита состоится **27 июня 2024 г. в 14:00** на заседании диссертационного совета 24.2.382.01 (Д 212.228.01) при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет» (СПбГМТУ) по адресу: г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3, актовЫй зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте СПбГМТУ (<https://www.smtu.ru>) в разделе «Наука».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Отзывы на автореферат просим направлять в двух экземплярах, заверенных печатью, по адресу: по почте – 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, д.3, СПбГМТУ (отдел ученого секретаря).

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Д.А. Пономарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Безэкипажные морские транспортные объекты (БМТО) или морские робототехнические комплексы (МРТК) находят широкое применение в работах, связанных с поиском, патрулированием, мониторингом и получением оперативных данных из определенных регионов мирового океана.

В то же время единичный БМТО, каким бы интеллектуальным он ни был, может использоваться только для решения некоторых частных задач или выполнения простых операций, поскольку обладает сравнительно малыми возможностями (небольшой радиус действия, ограниченный бортовым энергоресурсом, небольшое число выполняемых функций, ограниченное набором исполнительных устройств, невысокая вероятность выполнения поставленной задачи при функционировании в экстремальных ситуациях и т.д.).

Единичный БМТО или безэкипажное судно (БЭС) способен частично обеспечить выполнение поставленной задачи, в то время как группа, включающая в свой состав несколько судов (такие группы могут быть как гомогенные – однородные, состоящие из одинаковых судов, так и гетерогенные – разнородные, состоящие из судов разных типов и назначения) позволяет выполнять более широкий спектр задач. Группа из нескольких БЭС имеет возможность в течение долгого времени производить мониторинг, патрулирование или обследование акватории. Работы МРТК в экстремальных условиях, например, в Арктическом регионе РФ, позволяют проводить исследование подледных структур ледового покрова, тогда как решение задач «патрулирования» акватории группой МРТК дает возможность формировать пространственные «рубежи» для выполнения функций противолодочной борьбы (ПЛБ) и пассивного акустического мониторинга (ПАМ).

Следует отметить, что под «позиционными» задачами подразумевается тип задач, поставленных перед группой БМТО, выполнение которых подразумевает:

- обследование, патрулирование или мониторинг заданной акватории;
- перемещение вдоль целевых траекторий или в целевые позиции, параллельно осуществляя накопление данных устройствами полезной нагрузки (СТД зонды, пассивные акустические профилографы, измерители скорости звука в воде);
- групповое технологическое обслуживание подводной инфраструктуры.

Данные задачи выделены как приоритетные, в таких документах, как «Паспорт программы инновационного развития ПАО «Газпром» до 2025 года» п. 3.9 «Технологии применения подводных робототехнических комплексов для контроля технического состояния объектов обустройства морских месторождений» и национальных программах «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года». Актуальность развития технологий морской робототехники так же отмечена в «Стратегии развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года» (Распоряжение Правительства РФ № 1930-з от 30 августа 2019 года) и в «Основах государственной политики

Российской Федерации в Арктике на период 2035 года» (Указ президента Российской Федерации № 164 от 5 марта 2020 года). В перечисленных документах указывается на отсутствие технических средств нового поколения, недостаточное развитие российских океанографических автоматических и автономных средств измерений, неготовность системы мониторинга окружающей среды, размещенной в Арктической зоне.

В настоящее время, для своевременного выполнения данных постановлений необходимо рассматривать возможности применения групп автономных безэкипажных судов (или БМТО). Применение автономных БЭС накладывает дополнительные требования к их проектированию и эксплуатации. Использование групп судов и БМТО ставит принципиально новые задачи в области теории корабля (науке, изучающей в том числе вопросы маневрирования судов в реальных условиях). Когда речь идет о группах безэкипажных автономных объектов такие требования как устойчивое движение по заданному курсу с заданными скоростями должны быть выполнены с учетом взаимодействия их в группе, безопасности их перемещения в неопределенной среде и имеющихся ограничений в системе связи. В связи с чем, возможности маневрирования группы судов (агентов), организованных в виде мультиагентной системы, напрямую будут зависеть от системы планирования перемещения группы в реальных условиях плавания, которая должна учитывать такие внешние параметры среды как течения, волны, препятствия и др.

При разработке мультиагентной модели движения группы БМТО необходимо учесть особенности, связанные с функционированием аппаратов в недетерминированной (неопределенной динамически-изменяющейся) морской среде. Чтобы обеспечить полную картину океанологического состояния акватории, необходимо организовывать качественное взаимодействие между членами группы, способное обеспечить сохранность строя БМТО, возможность его реконфигурации в случае маневрирования группы, к примеру, в условиях прохождения узкостей и каналов. Применение групп БМТО, в том числе БЭС и МРТК приведет к существенному повышению качества экологических прогнозов, их актуальности и своевременности. Таким образом, задача разработки имитационных комплексов, позволяющих обеспечить предварительное исследование систем и алгоритмов группового управления БМТО, является актуальной.

Цель диссертационной работы – разработка математических моделей движения и взаимодействия групп морских безэкипажных судов (морских робототехнических комплексов), обеспечивающих их своевременное и безопасное маневрирование в неопределенной среде функционирования.

Научная проблема, решение которой содержится в диссертации – создание комплексной математической модели мультиагентной системы БМТО, обеспечивающей безопасное движение группы заданным строем с возможностью реконфигурации и одновременным выполнением целевой миссии в акватории, а также исследование

разрабатываемой системы методами математического и компьютерного моделирования, позволяющее спрогнозировать поведение группы в реальных условиях функционирования.

Основные задачи исследования:

Прогнозирование поведения таких групп БЭС в условиях дополнительных внешних воздействий требует комплексного исследования, в рамках которого должны быть решены следующие задачи:

- анализ существующих подходов к решению задач в сфере группового управления безэкипажными судами и морскими робототехническими комплексами, выбор подходящих методов прогнозирования (планирования) и законов управления движением группы судов, обеспечивающих их безаварийное перемещение в недетерминированной морской среде;

- разработка комплексной математической модели мультиагентной системы морских объектов, учитывающей совокупность значимых физических факторов, динамические свойства объектов и минимизирующей риск аварийных ситуаций в процессе группового движения. Построение модульной архитектуры модели с детальной проработкой ее состава и структуры, способствующей улучшению полезных качеств группы морских объектов;

- создание среды имитационного моделирования маневрирования группы безэкипажных морских объектов на основе математической модели мультиагентной системы для различных сценариев эксплуатации;

- проведение натурных исследований на экспериментальном стенде, который включает в себя три макета БЭС и программно-аппаратный комплекс группового управления, с целью оценки эффективности разработанной модели мультиагентной системы.

Методы исследования. В работе использованы методы современной теории управления, методы группового управления, методы математического моделирования. Проверка разрабатываемых алгоритмов проведена с использованием численных методов в среде Matlab. Разработка среды имитационного моделирования проводилась при помощи применения методов объектно-ориентированного программирования на языках Python и C++ в системе ROS.

Наиболее существенные новые научные результаты, полученные автором:

- разработана новая мультиагентная система управления группой БМТО, обеспечивающая перемещение группы заданным строем в недетерминированной среде с препятствиями и заданным полем течений;

- разработана система планирования перемещения группы БМТО, отличающаяся анализом и обработкой данных от сенсорной системы каждого отдельного объекта в группе, работающая в режиме реального времени;

- впервые разработан программно-аппаратный комплекс моделирования перемещения группы БМТО, отличающийся учетом параметров течений морской среды при планировании миссии и позволяющий найти оптимальные решения для различных сценариев эксплуатации;

– проведены серийные макетные экспериментальные исследования функционирования мультиагентного комплекса, подтвердившие работоспособность, эффективность и надежность разработанных систем и алгоритмов управления.

Практическая значимость работы. Представленные результаты могут быть использованы в научно-исследовательских и проектных организациях (АО «НПП ПТ «Океанос», АО «ЦКБ МТ «Рубин», АО «Концерн «НПО «Аврора» и др.) при проектировании и исследовании систем группового управления БЭС и МРТК. Разработанный набор систем и алгоритмов позволяет расширить функциональные возможности применения групп БЭС, БМТО и МРТК в априори неизвестных условиях среды функционирования, повысить качество получаемых данных в процессе работы группы, достигнуть большей эффективности выполнения задач группой МРТК, связанных с сбором оперативных океанологических данных, патрулированием акватории, мониторингом и поиском полезных ископаемых, а также обследованием подводных потенциально опасных объектов. Представленные рекомендации могут быть использованы при разработке математических моделей учебно-тренировочных комплексов и навигационных тренажеров.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением принципов и методов теории управления, подтверждается результатами компьютерного моделирования и результатами натурных экспериментов на макетах робототехнических комплексов.

Положения, выносимые на защиту:

– методология разработки математической модели описания движения группы БМТО (и отдельных объектов группы) на основе комбинированной структуры подсистемы планирования, обеспечивающей перемещение на желаемые позиции с возможностью реконфигурации строя на основе карты течений и обхода труднопреодолимых препятствий, что существенно улучшает полезные качества автономных кораблей и судов, а также безопасность их движения в неопределенной среде;

– математические модели для прогнозирования поведения группы БМТО в реальных условиях плавания в виде программно-аппаратного комплекса имитационного моделирования, позволяющего исследовать поведение групп БЭС и судна-носителя в реальных условиях плавания на основе имеющейся карты течений акватории, что в свою очередь дает возможность осуществить безопасную эксплуатацию судов и их автономных групп в недетерминированной морской среде с препятствиями;

– результаты применения разработанных систем и алгоритмов в имитационной математической модели движения группы БМТО, демонстрирующие новый уровень функциональных возможностей групп БМТО при выполнении задач мониторинга и патрулирования акватории, а также адаптивное взаимодействие между подвижной группой роботов и судном-носителем;

– результаты экспериментального исследования систем и алгоритмов управления группой БЭС на основе масштабного стенда.

Апробация работы.

Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались на: международных конференциях «Экстремальная робототехника» с 2019 по 2023 г. Санкт-Петербург, Россия; Всероссийских конференциях «Перспективные системы и задачи управления» с 2019 по 2023 г. п. Домбай, Россия; международной конференции «Морские технологии» 2021 г. Геленджик, Россия; 22-ой Международная IEEE конференция EDM-2021 Алтай, Россия; всероссийской конференции «гидрометеорология и экология: достижения и перспективы развития» 2019 г.; на всероссийской конференции молодых ученых «Комплексные исследования мирового океана» 2019 г. Севастополь, Россия; Международной конференции по морской робототехнике в освоении океана 2019 г., Санкт-Петербург, Россия; Международной стратегической сессии «Морская робототехника: проекты и практика» МВиК «Нева-2023».

Разработки по теме диссертации отмечены 2-мя премиями «Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа» организованного Министерством энергетики Российской Федерации в 2019 и 2020 году.

Реализация и внедрение.

Теоретические и практические результаты, полученные в рамках исследования и работы по теме диссертации, использованы при выполнении научно-исследовательских работ АО «НПП ПТ «Океанос», в том числе при решении задачи мониторинга радиационных опасностей на акватории Кольского залива в процессе межведомственного опытно-исследовательского учения МЧС России «Безопасная Арктика-2023» и натурных экспериментов на Беломорской Биологической Станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова в морских полигонах акватории пролива «Великая Салма». Также разработанный программный комплекс внедрен в СПбГМТУ и успешно использовался в рамках исполнения Государственного контракта.

Личный вклад автора. Все научные результаты диссертации, выдвигаемые на защиту, получены автором лично.

Публикации. Основные результаты исследований по теме диссертации изложены в 20 работах, из которых 10 статей в рецензируемых журналах из перечня рекомендованного ВАК Минобрауки России для публикации диссертационных исследований (содержится 60% материала); 6 публикаций, опубликованных в изданиях, индексируемы базах данных Scopus или Web of Science (содержится 30 % материала); 4 опубликованных в других изданиях и материалах конференций (содержится 10% материала).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, список литературы содержит 132 наименования, объем работы – 130 страниц, включая 76 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, определены важные на данный момент проблемы в сфере разработок систем группового управления МРТК, сформулированы

основные цели и задачи исследования, приведена структура работы, характеризуется научная новизна и практическая ценность работы.

В первой главе проведен анализ существующих методов и подходов к построению математических моделей и систем управления БМТО и МРТК. Приводится описание сфер использования групп БМТО и задач, которые решаются их применением. Обращается внимание на сферу «позиционных задач», т.е. задач, связанных с областью оперативной океанографии и применение для решения этих задач гомогенных и гетерогенных групп МРТК.

Для реализации мультиагентной системы был рассмотрен ряд методов поиска пути в пространстве. На настоящий момент существенный вклад в развитие различных методов одиночного и группового управления внесли отечественные ученые (А.Р. Гайдук, И.А. Каляев, С.Г. Капустян, В.Х. Пшихопов, М.Ю. Медведев, В.И. Городецкий, Лохин, Л.А. Мартынова и др) и зарубежные (Стивен Лавалье, Тор Фоссен, Вито Триани и др.). На основании анализа, выявлены преимущества и недостатки, с учетом специфики решения «позиционных» задач в морской среде. Была разработана комбинированная схема модели планирования, совмещающая в себе модуль стратегического (глобального) планирования и модуль тактического (локального) планирования.

Таким образом в заключении главы сформулированы цель и научные задачи диссертационного исследования: формирование теоретической основы построения системы группового управления (СГУ) и планирования перемещения группы БМТО способной реагировать на условия изменения внешней среды как на стратегическом, так и на тактическом уровне; обеспечение решения задач, связанных с движением группы заданным строем, реконфигурацией строя позволяющей прогнозировать поведение группы в реальных условиях функционирования (обход судами препятствий, расхождение судов, прохождение узкостей на пути движения).

Вторая глава описывает разработку системы и реализующих ее алгоритмов, организующих перемещение группы БМТО в неопределенной среде с препятствиями.

В диссертации основное внимание уделяется мультиагентной модели группового планирования перемещения группы морских объектов (агентов) в двухмерной среде со стационарными и динамическими препятствиями.

В работе рассматривается следующая формализованная постановка задачи. Площадь акватории S , в которой перемещается группа R , состоящая из N количества роботов $r_i \in R$, ($i = \overline{1, N}$). В глобальной системе координат каждый агент группы имеет собственные координаты (x_i, y_i) . Точка старта движения группы P_s , отличная от места спуска аппаратов (берег или судно носитель). Область функционирования группы Ψ_g , которая для частного случая группы R из 3-ех роботов ($N = 3$) определяется выражением:

$$\begin{aligned} \partial_{r_1} &= \Xi_1 \cap \Xi_2 \\ \partial_{r_2} &= \partial_{r_i} \cap \Xi_3 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Psi_g = \partial_{r_1} \cap \partial_{r_2}$$

Граничные области функционирования каждого агента $\Xi_i(d_{r_{i,j}}, r_{con})$ зависят от дистанции между агентами $d_{r_{i,j}}(t) (i, j = \overline{1, N}, i \neq j)$ и от предельной дальности используемой системы связи r_{con} . Таким образом структура строя (формация) Φ является множеством из M допустимых целевых положений $\vartheta_\Phi \in \Phi (i = \overline{1, M} \in \Psi_g)$. Целостность строя строго определяется условием $\Psi_g = \partial_{r_1} \cap \partial_{r_2}$.

Группе аппаратов необходимо осуществить перемещение из точки P_s с координатами (x_s, y_s) в точку P_f с координатами (x_f, y_f) с учетом обхода динамических $O_d = \{o_{d_1}, o_{d_2}, \dots, o_{d_j}\}$, где $(j = \overline{1, M})$ M - общее количество динамических препятствий, (перемещающихся с постоянной скоростью) и статических препятствий $O_s = \{o_{s_1}, o_{s_2}, \dots, o_{s_k}\}$, где $(k = \overline{1, L})$ L - общее количество статических препятствий, положение которых в области S априори неизвестно.

Дополнительно рассматривается, что в области S действует ряд стационарных течений (линейной и вихревой структуры). Поле течений представляет собой двумерное векторное поле W содержащие точки $\chi(\varrho, \xi) \in W(\varrho, \xi) \in W$, где каждая точка χ имеет свою интенсивность ϱ и направленность ξ течения. В таком случае $S = R \cup O_d \cup O_s \cup W$.

Схематично формализованная постановка задачи представлена на рисунке 1.

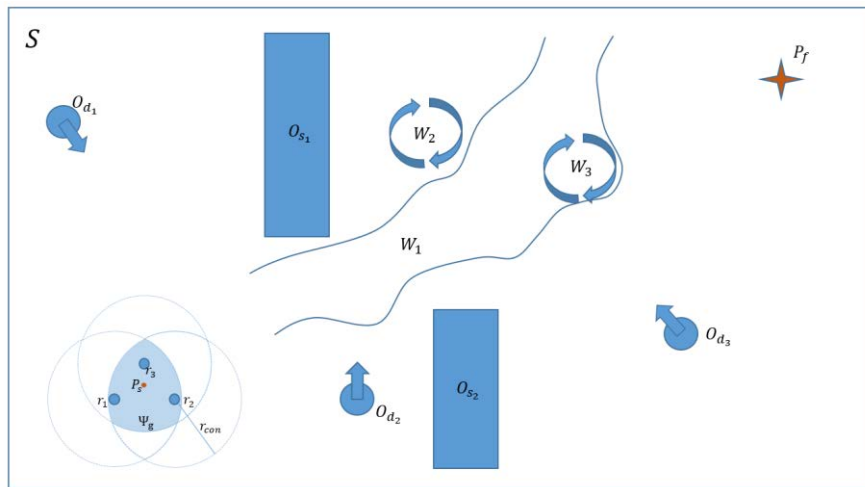


Рисунок 1. Схематическое изображение решаемой задачи

Рассматриваемая группа роботов может представлять собой как гомогенную (однородную), так и гетерогенную (разнородную) группу. В данном случае рассматривается группа R , состоящая из N идентичных агентов $r_i \in R, (i = \overline{1, N})$. Рассматриваемые агенты группы имеют:

- сортовое устройство управления и инерциальную навигационную систему, определяющую текущее значение вектора состояния агента;
- идентификационный номер (id) для его учета в СГУ;

– возможность обмена данными (передачу своих собственных координат/получение координат других агентов в группе) по каналам гидроакустической и радиосвязи.

Алгоритм построения характеристической карты течений, позволяет провести расчет для любой произвольной точки P_{cur} на карте акватории параметров интенсивности и направленности:

$$\xi_{P_{cur}} = \frac{\xi_i - \xi_{i-1}}{2} \quad (2)$$

$$q_{P_{cur}}(j, k) = \frac{(q_{jk} - q_{jk-1})}{2}$$

где $\xi_i = atan(\Delta y_i / \Delta x_i)$ x_i, y_i – текущие точки в которых рассчитывается направленность течения, $q_{jk} = Flow * (1 + \Delta Q)$, при $j=1$ и $q_{j1} = q_{(j-1)1} * K_{int}$, при $j=2$ $\Delta Q = [-0.1 \dots 0.1]$ – коэффициент изменения интенсивности течения. Пример построения характеристической карты для поверхностных течений черноморского региона представлен на рисунке 2.

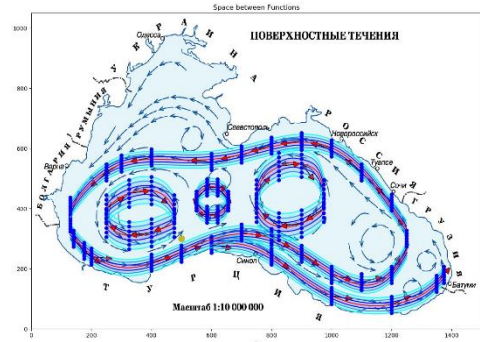


Рисунок 2. Пример построения карты поверхностных течений черноморского региона

Состояние каждого агента $r_i \in R$ можно описать в виде вектора-функции:

$$s_{r_i}(t) = [s_{r_{i,1}}(t), s_{r_{i,2}}(t), \dots, s_{r_{i,n}}(t)]^T \quad (3)$$

Переменная $s_{r_{i,n}}(t)$ включает в себя координаты $x_i(t), y_i(t)$, скорость, ускорение, а также угол курса $\varphi_i(t)$ агента $r_i \in R$.

Следует отметить, что интенсивность q и направленность ξ течений - известные параметры (рассматривается случай при использовании заранее известной карты течений региона функционирования).

Целью групповой системы планирования движения является обеспечение движения группы БМТО заданным строем.

Изучив методы и алгоритмы перемещения РТК в средах с подвижными и неподвижными препятствиями, стремясь создать унифицированную систему, учитывающую особенности функционирования в морской среде в режимах реального времени, автор сформировал ряд требований и критериев (см. таблицу 1), которые бы оценивали качество разработанных систем и алгоритмов.

Таблица 1. Основные требования к разрабатываемой системе планирования перемещения группы.

Критерий	Определение
Сохранность	Агенты в группе R должны перемещаться на безопасном расстоянии d_{safe} как друг от друга так и препятствий.

Локальность	Агенты оперируют информацией, полученной исключительно в ближней зоне своего функционирования Ψ_i (или функционирования группы Ψ_g).
Децентрализованность	Каждый робот r_i в группе R является самостоятельной единицей и имеет свой собственный модуль САУ и модуль планирования.
Масштабируемость	Система работает независимо от количества роботов в группе.
Адаптируемость	Система должна учитывать неопределенности среды и адаптироваться к подобным изменениям, с учетом сохранения потенциала нахождения наилучшего маршрута.

Предлагаемый в работе новый подход к организации адаптивной СГУ БМТО основывается на разработке ряда алгоритмов, которые учитывают особенности функционирования в морской среде с учетом неизвестных статических и динамических препятствий и имеющейся карты течений:

1. Система децентрализованного построения карты глобального планировщика, отличающаяся квази-рандомным алгоритмом построения деревьев возможных траекторий в расчетной области пространства (quasi-randomized rapidly exploring tree) адаптированная для применения в морских средах в режимах реального времени, с учетом получения данных от системы технического зрения (СТЗ) и информации об имеющихся течениях в регионе.

2. Алгоритм формирования единого поля видимости группы Θ_g и расчета наполненности $\bar{\Theta}_g$ в группе, позволяющий агентам оценивать внешнюю обстановку, в области взаимодействия группы Ψ_g , и принимать соответствующие решения о реконфигурации строя группы. Пример того, как может быть оценено общее поле видимости представлены на рисунке 3.

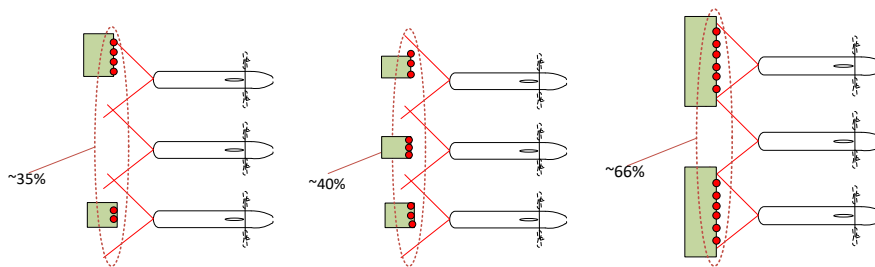


Рисунок 3. Составление общего поля видимости

3. Алгоритмы перестроения глобальной и локальной траектории движения группы на основе единого поля видимости Θ_g . В частном случае, структурная схема СГУ состоящей из 3-ех ($N = 3$) может быть представлена на рисунке 4.

Для реализации системы локального планирования предложено изменение стандартного метода потенциальных полей за счет введения визуальных данных, получаемых от модуля СТЗ (визуальное потенциальное поле). Визуальное потенциальное поле генерирует необходимое воздействие на САУ БМТО не только в зависимости от имеющихся дистанций между агентами в группе и препятствиями, но и в зависимости от визуальной информации, получаемой от СТЗ.

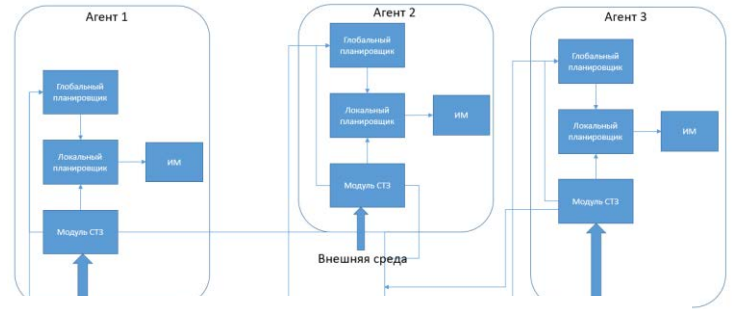


Рисунок 4. Структурная схема разрабатываемой системы группового управления БМТО

генерирует необходимое воздействие на САУ БМТО не только в зависимости от имеющихся дистанций между агентами в группе и препятствиями, но и в зависимости от визуальной информации, получаемой от СТЗ.

СТЗ может быть представлена в различном исполнении:

- Система ЛИДАР.
- Камеры глубины, предоставляющей облако точек в надводном исполнении.
- Система активной гидролокации в подводном исполнении.

Идея использования данных с СТЗ для определения силы отталкивания в методе потенциальных полей имеет ряд преимуществ перед стандартным методом, который опирается на расстояние от препятствий:

- Более точное управление.
- Адаптация к форме препятствий.
- Адаптивность к динамическим изменениям.
- Уменьшение ситуаций попадания в локальные минимумы.

Притягивающая сила может быть определена в виде:

$$F_{att} = \begin{cases} -0.4 * [x(i), y(i)] - \frac{[x(i)_{goal}, y(i)_{goal}]}{D}, & D_{att} > \epsilon \\ 0, & D_{att} < \epsilon \end{cases} \quad (4)$$

$$D_{att} = \sqrt{(x_{AUV} - x|target)^2 + (y_{AUV} - y|target)^2} \quad (5)$$

В свою очередь в составляющей силы отталкивания примем в расчет данные от СТЗ совместно с экспоненциальной функцией, увеличивающей силу отталкивания от препятствий:

$$F_{rep_r} = \begin{cases} \sum_l c * \frac{e^{(-\beta * d_l)}}{d_l} * \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{bmatrix}, & D_{rep_{near_{AUV}}} > \epsilon \\ 0, & D_{rep_{near_{AUV}}} < \epsilon \end{cases} \quad (6)$$

где $c, e^{(-\beta * D_{rep})}$ – коэффициенты настройки силы отталкивания, d_i – расстояния от робота до i -ой видимой точки препятствия с координатами (x_{obs}, y_{obs}) , γ – угол направления между

МРТК и обнаруженной видимой точкой препятствия рассчитанный как $\gamma = \text{atan2}(y_{r_i} - y_{obs}, x_{r_i} - x_{obs})$.

Таким образом, общая составляющая силы визуального потенциального поля находится, как сумма всех сил, действующих на МРТК в процессе его движения.

$$F_{total} = F_{att} + F_{rep} \quad (7)$$

Для решения **задачи глобального планирования** разработан новый двухуровневый алгоритм формирования квази-случайных деревьев возможных траекторий в расчетной области пространства (quasi-randomized rapidly exploring tree). Данный алгоритм адаптирован под применение в морских средах в условиях работы с различными структурами течений. Основным преимуществом данного алгоритма является возможность его использования в недетерминированных средах в режиме реального времени без предварительно загруженной карты местности. Использование данного алгоритма специально нацелено на увеличение скорости поиска траектории с учетом неголономных ограничений.

Первый уровень отвечает за построение глобальной траектории для каждого агента в группе, с учетом ограничений, наложенных на структуру формации. Однако, как показывает практика, недетерминированность морской среды и особенности функционирования в условиях течений и волнения, могут вносить существенные внешние возмущения, и это приводит к потере структуры формации. Для решения данной проблемы в работе введен второй уровень глобального планирования.

Второй уровень отвечает за построение глобальной траектории для центра формации БМТО. Полученная траектория позволяет агентам, в случае потери структуры формации или реконфигурации, вернуться в изначально сконфигурированный строй. В случае потери связи или нарушения условия сохранения формации, агенты, находящиеся в группе, переходят в режим ожидания в точке, до тех пор, пока «отставший» агент не вернется в формацию и строй не будет восстановлен.

Работа алгоритма формирует массив точек n_{par} , которые описывают вершины веток деревьев, используемых в построении траектории, на основе выбора минимальных значений стоимости перехода $n_{par} = \min(C_{base})$ из текущей точки нахождения агента, где $C_{base}(n, n_{par})$ базовая стоимость перемещения от вершины n_{par} , к n . После этого строится новая ветвь дерева T_{tree} от точки n_{new} к точке n_{par} . Иллюстрация работы алгоритма представлена на рисунке 5.

Данная технология реализует не только функционирование группы в динамически изменяющейся среде (без предварительного картографирования местности), но и позволяет произвести резервирование возможности выхода робота из области локального минимума (в случае, если алгоритм локального планирования допустил ошибку).

На заключительной стадии алгоритма происходит процесс перестроения дерева, с целью оптимизации построенной траектории на основе данных с СТЗ, что позволяет формировать новые траектории вдоль дерева.

При затраченной стоимости перехода $C_{base} > C_{totalneigh}$ строится соответствующая ветвь дерева и удаляется предыдущая, если $C < C_{totalneigh}$ то алгоритм работает без изменений.

Заканчивая процесс перестроения ветвей дерева, с учетом прохождения всех итераций алгоритма, группа БМТО начинает перемещение по полученной траектории. Пример работы алгоритма при различных формах препятствия представлен на рисунке 6.

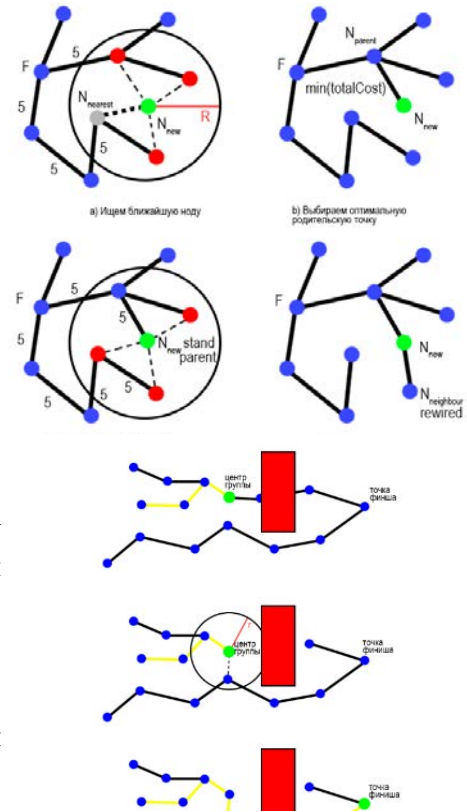


Рисунок 5. Пример работы перестроения глобальной траектории в случае обнаружения препятствия.

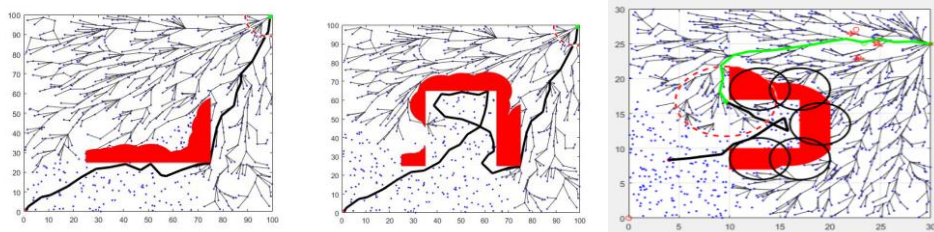


Рисунок 6. Обход препятствия типа «квадрат» и «П» образного типа в режиме реального времени

Для учета интенсивности и направленности течения в алгоритме была изменена функция расчета стоимости (целевая функция), определяющая насколько хорошо конкретная вершина подходит для расширения дерева:

$$C_{base}(n, n_{par}) = C_{base}(n, n_{par}) + w_{\varrho} * \varrho + w_{\xi} * \cos(\xi(n) - \beta_{par}) \quad (9)$$

где $\rho(n)$ – интенсивность течения в точке n , w_ρ – весовой коэффициент для интенсивности течения, $\xi(n)$ – направленность течения в точке n , w_ξ – весовой коэффициент направленности течения, β_{par} направление из вершины n в вершину n_{par} .

Как видно из выражения 9 общая стоимость $C_{base}(n, n_{par})$ учитывает как интенсивность течения в точке n , так и угол между направлением течения и направлением движения от n_{par} к n . Весовые коэффициенты w_ξ и w_ρ позволяют корректировать значения интенсивности и направленности в каждой точке области, в которой есть наблюдаемое течение (за основу берется карта течений акватории). Пример представлен на рисунке 7.

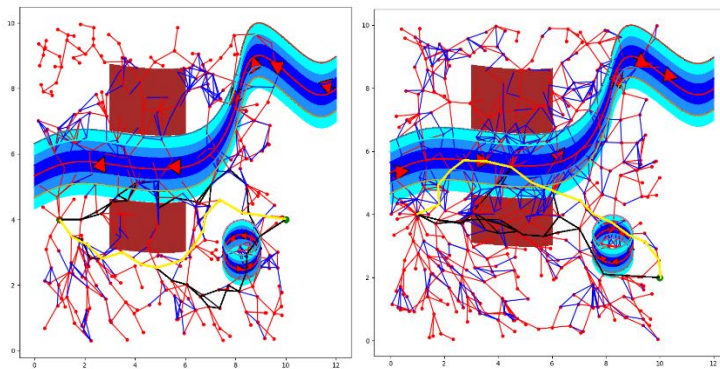


Рисунок 7. Пример работы алгоритма квази-рандомных деревьев в недетерминированных условиях с течениями

На рисунке 7 изображена карта течений (синий градиент) с различными параметрами интенсивности и направленности. В случае, когда направленность течения и направление целевого пути совпадают (стоимость пути меньше), соответствующая траектория (желтый путь) принимается как целевой (правый рисунок). В случае, когда направленность течения не совпадает с направлением целевого пути (стоимость пути больше), целевая траектория рассчитывается на основе имеющихся узлов деревьев (желтая траектория). Красными ветками дерева обозначены рассчитанные пути, имеющиеся в памяти глобального планировщика. Синие ветви – перестроенные (результат работы алгоритма rewiring). Черные пути – траектории, которые были «отсеяны» планировщиком, как недопустимые в ходе перемещения по траектории.

Параметры направленности $\xi(n)$ и интенсивности $\rho(n)$ также могут быть учтены и в иных алгоритмах планирования пути (таких как A^* , D^* и другие), однако учет переменных $\xi(n)$ и $\rho(n)$ в составе алгоритма квази-рандомных деревьев имеет ряд преимуществ:

- скорость и расширяемость: квази-RRT* изначально является методом для быстрого исследования пространства с целью поиска пути, что делает его расширяемым на большие пространства;
- адаптивность к динамике: квази-RRT* способен адаптироваться к динамическим изменениям в среде, включая течения. Это может быть полезно в сценариях, где течения могут

меняться со временем или в разных областях. D* хотя и мог бы учитывать течения, обычно не так адаптивен к динамическим изменениям. Это важно в морской среде, так как в ней могут возникать изменения в течениях, погоде, ситуации с расхождением судов и прохождении узкостей. Метод RRT* может адаптироваться к таким изменениям и искать наилучший маршрут на основе текущих условий;

- обрабатывать сложные препятствия: квази-RRT* может лучше справляться с пространственными особенностями и сложными препятствиями, такими как узкие коридоры и области с острыми углами;

- поддерживать динамические ограничения: квази-RRT* может быть расширен для учета динамических ограничений на движение (например, ускорение, скорость), что позволяет учитывать физические ограничения судна при планировании пути.

В третьей главе описывается процесс моделирования движения группы виртуальных моделей агентов на основе разработанных систем и алгоритмов СГУ.

Для разработки имитационного комплекса моделирования перемещения группы РТК с учетом различных сценариев, использован специализированный Фреймворк ROS, сторонние библиотеки для реализации анализа и визуализации данных (Matplotlib, pyGame, Tkinter, PyQt и другие). Архитектура имитационного комплекса основывалась на применении методов объектно-ориентированного программирования с использованием языков Python и C++.

Для более эффективного и скоординированного планирования пути, разработана процедура распределения деревьев в группе. Агенты имеют возможность обмениваться информацией о своих новых вершинах n_{new_i} и их стоимостях $C_{base}(n_{new_i}, n_{nearest})$, при следующем процессе обновления собственного дерева T_{tree_i} агент учитывает ближайшие вершины $n_{nearest}$ с соседних деревьев. Агент обновляет свое дерево, добавляя новую вершину n_{new_i} и устанавливая $\min(n_{new_i})$ в качестве её родителя. В случае пересечения ветвей $n_{new_i} \cap n_{nearest}$ они отсекаются. Таким образом каждый агент имеет информацию о собственном дереве глобального планировщика T_{tree_i} и информацию о соседних деревьях $T_{tree_{n-i}}$ как это показано на рисунке 8 для примера группы из трех агентов (три дерева для каждого агента из группы: синее, красное и зеленое).

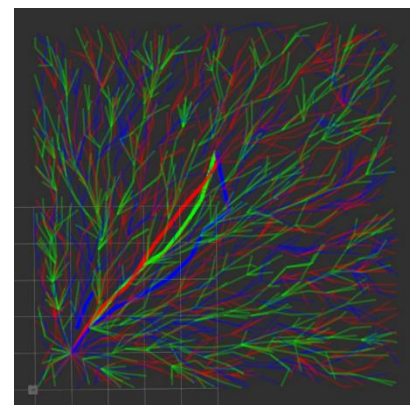


Рисунок 8. Пример построения деревьев T_{tree} для группы из трех агентов

На рисунке 9 представлен пример построения распределенной системы деревьев для группы (из трех агентов), функционирующей в области 70 на 100. При моделировании было учтено ограничение на общее количество узлов дерева не более 1000.

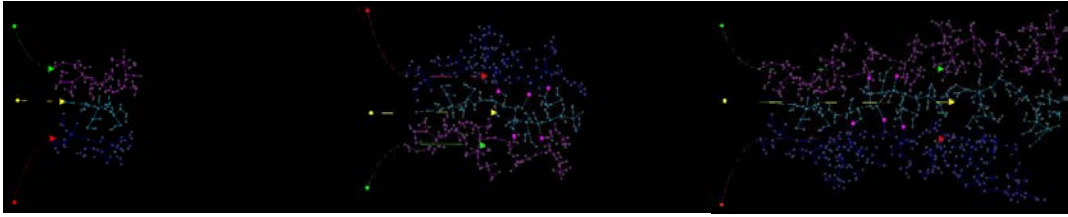


Рисунок 9. Моделирование распределенного построения деревьев глобального планировщика группой из трех агентов

На рисунке 9 представлены три дерева, соответствующих количеству агентов в группе. Как видно, структуры деревьев неоднородны, но алгоритм успешно определил точки сопряжения деревьев (выделены розовым цветом).

Сопряженное моделирование разработанного комплекса систем и алгоритмов представлено на рисунке 10. В рамках допущения, модель БМТО была представлена упрощенной трехмерной моделью, встроенной во внутренние пакеты ROS и Gazebo.

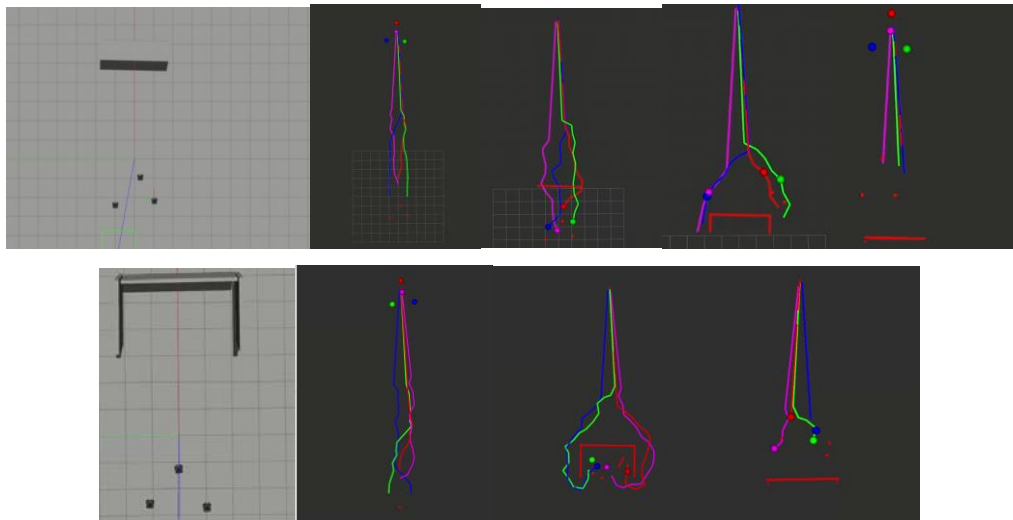


Рисунок 10. Моделирование перемещения группы из трех агентов в процессе обхода статических и динамических препятствий

Как видно из результатов моделирования, разработанная система обеспечивает успешный обход группой агентов обнаруженных препятствий. На втором эксперименте видно, как группа перешла в режим реконфигурации и после обхода препятствия снова сформировала строй.

Проведенное сравнение с иными методами (основанными на sample base принципах) построения глобальной траектории, показало преимущество разработанного алгоритма в скорости построения и длине конечной траектории. Также разработанные методы взаимодействия группы в совокупности с разработанными системами и алгоритмами планирования имеют больший процент успешности прохождения миссии (из 15 экспериментов в 13 разработанная система успешно выполнила миссию), чем при использовании иных алгоритмов.

Таблица 2. Сравнительный анализ полученных результатов.

	Время запуска с.	Длина траектории	Успешность
Предложенный алгоритм	0,016	82,95(<5.8%)	13/15
Theta*	0,018	88,110	11/15
D*-RRT	0,021	97.29	10/15
RRT	0,087	107,170	9/15
RRT*	9,141	124,942	12/15

Проведенный анализ показал:

- разработанная система целераспределения в группе ускоряет процесс формирования строя на 10-20% в зависимости от количества агентов группы;
- при идентичных условиях внешней среды (размер карты 70 на 100), длина траектории при использовании алгоритма на 5-7 % меньше, чем при применении иных sample base методах;
- разработанная система имеет высокий процент успешности по сравнению с иными методами;
- предложенный алгоритм обладает более высокой адаптивностью к изменчивым условиям среды, благодаря возможности быстро генерировать новые точки, что позволяет адаптироваться к изменениям в течениях и работе в условиях статичных и динамичных препятствий;
- разработанная система способна учитывать карту течений. Это позволяет системе планирования прокладывать лучшие маршруты в режиме реального времени на основе динамически изменяемой функции оценивания стоимости конечного пути.

В четвертой главе приводятся результаты серийных экспериментальных исследований функционирования однородной группы БЭК.

Однородная (гомогенная) группа БЭК представлена в виде трех мини-кораблей, оснащенных необходимым аппаратным обеспечением для перемещения в испытательной акватории.

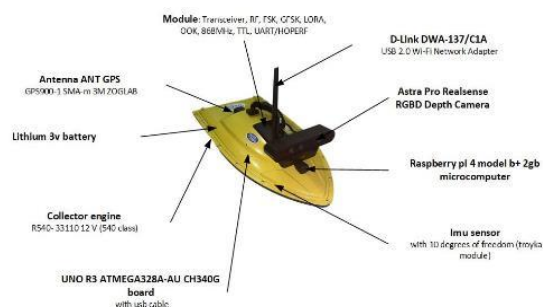


Рисунок 11. Группа БЭК и схематичное расположение аппаратного обеспечения БЭК

При экспериментальном исследовании СГУ БЭК, было сделано допущение о том, что движение БЭК происходит только в горизонтальной плоскости.

Целью первого эксперимента было перемещение группы из точки А в точку Б. Было проведено 10 измерений. Натурный эксперимент был проведен на территориях внутренних акваторий Санкт-Петербурга. Прямое расстояние от точки А в точку Б 25 метров (выбор расстояния обусловлен натурными ограничениями акватории, на которой проводился эксперимент). Полученные значения длины фактических пройденных траекторий для каждого мини-корабля в группе представлены в таблице 3. Дистанция между агентами не должна превышать 5 метров (условное расстояние работы системы связи).

Программное обеспечение БЭК также реализовано на ROS в целях аппаратно-программной интеграции с разработанным имитационно-моделирующим комплексом.

Таблица 3. Время построения дерева RRT и длина пути (первое испытание).

№ эксперимента	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время построения дерева, сек	0,433	0,451	0,442	0,432	0,442	0,412	0,421	0,412	0,423	0,411
Длина пути БЭК 1, м	26,82	27,112	28,023	25,93	29,12	26,84	26,93	30,03	26,34	28,53
Длина пути БЭК 2, м	27,23	26,91	28,93	27,26	27,42	25,81	25,96	27,34	27,45	27,53
Длина пути БЭК 3, м	26,12	29,14	27,34	26,32	26,75	28,21	28,96	26,78	28,44	29,53

Результат перемещения группы БЭК представлен на рисунке 12.

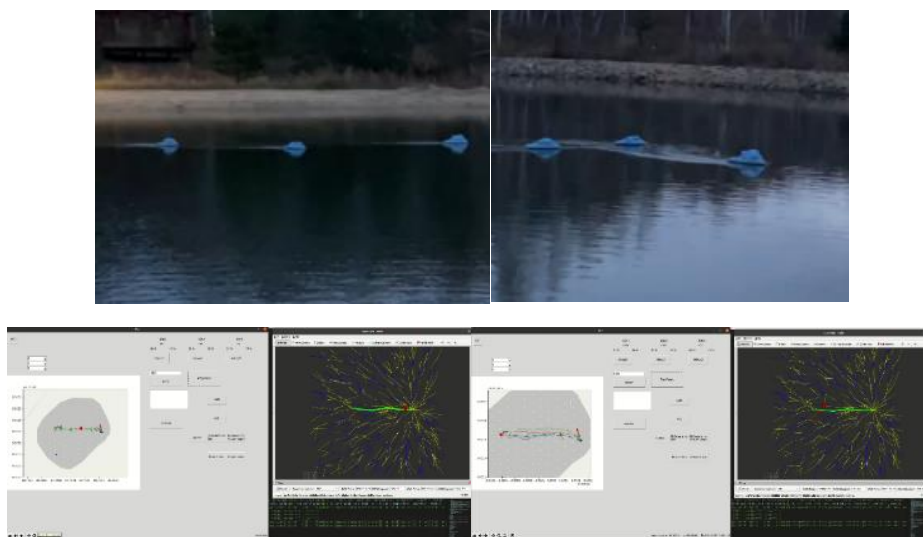


Рисунок 12. Натурный эксперимент работы группы БЭК

Целью второго эксперимента было проведение серии испытаний по обходу статического препятствия (обеспечить реализацию динамического препятствия в натуральных условиях имеющейся акватории не предоставлялось возможным). Расстояние от точки старта до точки финиша составляло 35 метров (выбор расстояния обусловлен натурными ограничениями акватории, на которой проводился эксперимент). В данном натурном эксперименте использован

лидар RPLIDAR S2 30m TOF. Было выставлено ограничение на дальность видимости до 10 м метров.

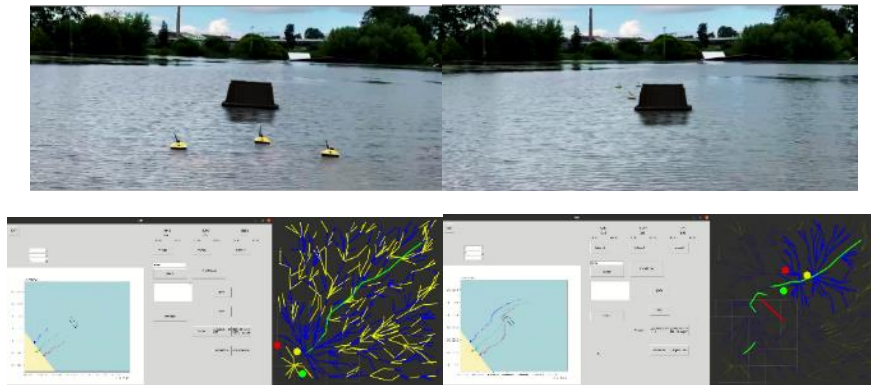


Рисунок 13. Полномасштабные испытания группового движения мини-катеров с учетом обхода препятствий

На рисунке 13 отображается результат натурального эксперимента, построенный в RVIZ в режиме реального времени. Красный, желтый и зеленый маркеры — это GPS координаты аппаратов. Красная сплошная линия — это препятствие, обнаруженное с помощью RPLIDAR S2.

На рисунке 14 показаны результаты полномасштабных испытаний в RVIZ в режиме реального времени; красные, желтые и зеленые маркеры — это GPS-координаты катеров; красная сплошная линия — это препятствие, обнаруженное RPLIDAR S2.



Рисунок 14. Пример обхода стационарного препятствия группой БЭК в процессе проведения натурального эксперимента

Было проведено 15 запусков. Из 15 тестов 3 были неудачными: дважды лидар и система объединения облака точек дала сбой, один раз возникла проблема с GPS.

Имеющаяся система связи в достаточной степени обеспечивала обмен навигационными данными. Следует отметить, что бортовой вычислительный компьютер на базе raspberry pi 4 не позволяет в полной мере реализовать обработку данных от СТЗ. Ввиду чего использовался дополнительный программный модуль фильтрации и сжатия (за счет уменьшения разрешения)

получаемых данных. Натурный эксперимент продемонстрировал возможность удержания формации в пределах 5 метров в условиях выполнения позиционных задач.

Полученные значения натурального эксперимента согласуются с результатами, полученными в имитационном комплексе.

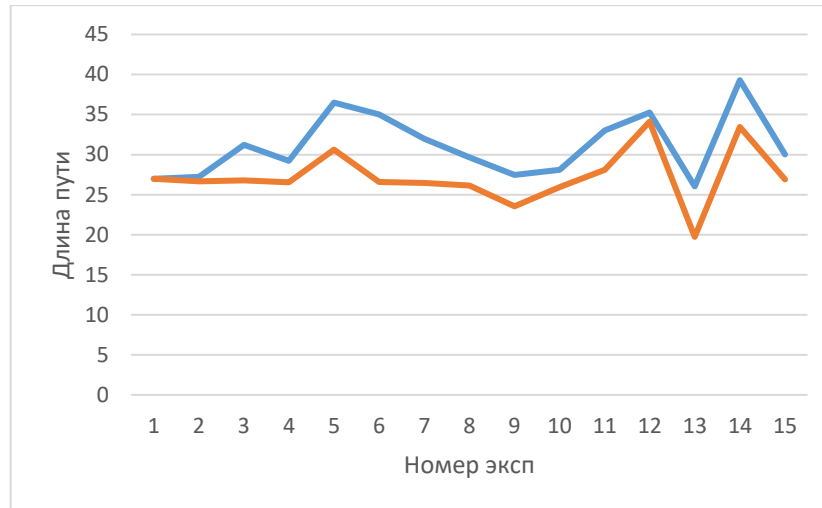


Рисунок 15. Сравнение результатов длины пути глобального планировщика, полученных в имитационном комплексе и натурном эксперименте (красная линия – моделирование, синяя линия натурный эксперимент)

Анализ демонстрируют, что разработанные системы и алгоритмы при функционировании в реальной среде имеют 10-13 % погрешности в сравнении с имитационным моделированием. Проведенные натурные эксперименты полностью подтвердили работоспособность предложенных в работе систем и алгоритмов.

Полученные результаты были приняты к внедрению в АО «НПП ПТ «Океанос» и СПбГМТУ.

Анализ полученных результатов позволил выработать рекомендации для разработки комплексных математических моделей мультиагентной системы морских подвижных объектов для профильных предприятий, занимающихся проектированием и разработкой БЭС и МРТК, в частности:

- В модуль планирования перемещения АНПА типа глайдер (для АО «НПП ПТ «Океанос») интегрировать цифровые карты течений. Карты могут быть реализованы на основе имеющихся карт из открытых источников или полученных от профильных исследовательских организаций.

- Разработанный метод интеграции цифровых карт течений может быть доработан, для учета в системе планирования траектории перемещения МРТК. Цифровые карты течений могут быть расширены, дополнительно могут быть учтены такие параметры как волнение, приливные течения и другие. Данные переменные могут учитываться в выражении (9) благодаря чему разработанный алгоритм планирования может рассчитывать новые целевые траектории.

– Применение разработанной мультиагентной модели и имитационного комплекса, позволит провести предварительное моделирование выполнения различного комплекса задач, к примеру, связанного с мониторингом, патрулированием и обследованием ППОО.

Использование разработанных моделей в составе групп БМТО, таких как группы АНПА, подводных глайдеров и гетерогенные группы МРТК, позволят существенно повысить качество получаемых данных в процессе выполнения задач геологоразведки (в частности, данных Центра морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова), сократить затраты на комплексные гидрографические и гидрометеорологические исследования (например, исследования АО ГНИНГИ в Северном Ледовитом океане) и работ по обследованию ППОО, выполняемых МЧС России.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты и выводы

В представленной диссертационной работе решена актуальная задача управления группой БМТО для выполнения позиционных (океанологических) задач, с учетом поддержания/реконфигурации структуры группы во время ее перемещения в недетерминированной среде с препятствиями в режиме реального времени.

При выполнении диссертационной работы были достигнуты следующие результаты, обладающие научной новизной:

1) комплексная математическая модель мультиагентной системы БМТО, отличающаяся учетом значимых физических факторов, динамических свойств объектов и обеспечивающая выбор эффективной стратегии безаварийного перемещения группы БМТО;

2) оригинальный алгоритм локальной системы планирования, основанный на модернизированном методе потенциальных полей. Разработанное визуальное потенциальное поле, позволяет избегать ситуаций попадания БМТО в области препятствий (или видимые области локального минимума), на основе обработки данных от системы технического зрения;

3) алгоритм обработки данных от системы технического зрения, отличающийся от известных расчетом параметра наполненности видимого сектора СТЗ, с целью формирования общего поля видимости и областей зон выхода / обхода препятствий;

4) алгоритм глобального планирования и реконфигурации траектории движения группы БМТО, отличающийся от известных введением квази-рандомизированной составляющей RRT, позволяющей учесть при формировании узлов деревьев и их перестроении (в режиме реального времени) не только неизвестные статические и динамические препятствия, но и характеристическую карту течений региона функционирования группы;

5) результаты, полученные в имитационном комплексе моделирования перемещения группы безэкипажных судов на основе математической модели мультиагентной системы для различных сценариев эксплуатации;

б) результаты натурных исследований на экспериментальном стенде, включающем в себя три макета БЭЖ и программно-аппаратный комплекс группового управления.

На основе полученных результатов разработаны рекомендации для научно-исследовательских и проектных организаций, занимающихся разработкой систем и алгоритмов управления БМТО.

По теме диссертации автором опубликовано 20 печатных работ.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов работ по диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук

1. А.М. Маевский Прогнозирование маршрутов движения морских беспилотных транспортных объектов в реальных условиях плавания на основе характеристической модели глобального поля течений // Морские интеллектуальные технологии, 2024. №1 (часть 1), С.66 – 72. <https://doi.org/10.37220/MIT.2024.63.1.007>

2. А.М. Маевский Прогнозирование безопасности и надежности движения группы безэкипажных судов с использованием имитационного комплекса моделирования мультиагентных систем // Труды Крыловского государственного научного центра, Т.1 № 407. 2024, С. 179-192.

3. А.М. Маевский, Р.О. Морозов, В.А. Рыжов, А.Е. Горелый Разработка многоуровневой системы планирования траектории движения группы АНПА в неизвестной среде с препятствиями // Известия Южного федерального университета. Технические науки, 2021. №1 (218), С. 30-47.

4. А.М. Маевский, Р.О. Морозов, А.Е. Горелый Разработка сценариев применения мультиагентного комплекса робототехнических систем в задачах оперативной океанографии «Морские Технологии 2021».

5. А.М. Маевский, В.Ю. Занин, И.В. Кожемякин Разработка комбинированной системы управления резидентным/интервенционным АНПА на основании поведенческих методов. Известия ЮФУ. Технические науки. 2020. №1 (211)

6. Маевский А.М., Гайкович Б.А Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений Углеводородов // Вести газовой науки № 2 (39) / 2019

7. А.М. Маевский, И.А. Печайко, С.А. Турсенев Применение морских робототехнических комплексов для мониторинга и анализа потенциально опасных подводных объектов // Научно-аналитический журнал проблемы управления рисками в техносфере (Problems of technosphere risk management) № 2 (58) С.32-39 – 2021

8. А.М. Маевский, В.Ю. Занин, С.А. Турсенев Групповое применение подводных планеров в задаче мониторинга подводных потенциально-опасных объектов на примере ликвидации аварийных разливов нефти // Научно-аналитический журнал проблемы управления рисками в техносфере (Problems of technosphere risk management) № 3 (59) – 2021

9. А.М. Маевский, С.А. Турсенев, А.С. Смирнов Робототехника в мониторинге глубин, "Гражданская оборона" 2022,-С. 42-44

10. А. М. Маевский, В. Ю. Занин, И. В. Кожемякин Перспективные высокотехнологичные экспортно-ориентированные и востребованные внутренним рынком направления морской робототехники // Робототехника и техническая кибернетика. – 2022. – Т. 10, № 1. – С. 5-13. – DOI 10.31776/RTCJ.10101. – EDN L BKNSJ.

Публикации в зарубежных журналах

11. Dmitry Nikushchenko, Andrey Maevskiy, Igor Kozhemyakin, Vladimir Ryzhov, Alexander Bondar, Artem Goreliy, Ivan Pechaiko and Ekaterina Nikitina **Development of a Cascade Intelligent System for Path Planning of the Group of Marine Robotic Complexes** *J. Mar. Sci. Eng.* **2023**, 11(3), 610; <https://doi.org/10.3390/jmse11030610>

12. Nikushchenko, D.; Maevskiy, A.; Kozhemyakin, I.; Ryzhov, V.; Goreliy, A.; Sulima, T. Development of a Structural-Functional Approach for Heterogeneous Glider-Type Marine Robotic Complexes' Group Interaction to Solve Environmental Monitoring and Patrolling Problems. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1531. <https://doi.org/10.3390/jmse10101531>

13. A.M Maevskiy, A.E Gorelyi and R.O Morozov, "Development of a Hybrid Method for Planning the Movement of a Group of Marine Robotic Complexes in a Priori Unknown Environment with Obstacles," 2021 IEEE 22nd International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), 2021, pp. 461-466, doi: 10.1109/EDM52169.2021.9507660.

14. Chernov, N. N., Kovalev, A. V., Palii, A. V., Sayenko, A. V., and Maevskiy, A. M The use of neural network technologies to optimize the shape of an object during mass transfer of air. *Materials Science and Engineering Conference Series*, 2020, vol. 862, no. 3, p. 32028. doi:10.1088/1757-899X/862/3/032028.

15. N N. Chernov, A. V. Palii, A. M. Maevskiy, A. S. Boldyreff, A. V. Kovalev, V. V. Ignatyev, O. B. Spiridonov Research application possibility of the optimized body form with the minimal force of aerodynamic drag for heat sink. *Proceedings Volume 11163, Emerging Imaging and Sensing Technologies for Security and Defence IV*; 111630K (2019) <https://doi.org/10.1117/12.2547826>

16. Chernov, N.N., Palii, A.V., Sayenko, A.V., Chernega, Y.G. Maevskii A.M. Numerical study of the aerodynamic characteristics of an axisymmetric profile of an optimized shape // *Applied Physics*, 2021, (1), pp. 5–11.

Публикации в иных изданиях

17. М.А. Маевский, С.А. Турсенев, А.С. Смирнов Применение гетерогенной группы морских робототехнических комплексов в качестве сетцентрических систем мониторинга подводных потенциально-опасных объектов и загрязнений на морской акватории // *Материалы международной научно-практической конференции «Сервис безопасности в России: опыт, проблемы, перспективы мониторинг, предотвращение и ликвидация чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»* 2021.–С. 22-29

18. М.А. Маевский, И.В. Кожемякин Применение систем искусственного интеллекта в морской робототехнике. Существующие разработки в мире и возможности развития в РФ // Морские информационно-управляющие системы 2021г., №1(19), С. 39-49.
19. Chernov, N.N., Paliy, A.V., Saenko, A.V., Maevskiy A.M A Method of Body Shape Optimization for Decreasing the Aerodynamic Drag Force in Gas Flow. // Technical Physics Letters, 2018, Vol. 44, No. 4, pp. 328-330. [10.1134/S106378501804017X](https://doi.org/10.1134/S106378501804017X)
20. Kostyukov, V.A., Maevskiy A.M., Medvedev, M.Yu., Pavlenko, D.D., Poluyanovich, N.K. Investigation of a rotor speed controlling of a promising wind-driven power plant using several variable elements of its geometry // Мехатроника, Автоматизация, Управление., 2020, 21(10), pp. 599–608