



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра морских информационных систем

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

На тему: «Исследование возможности применения систем прецизионного точечного позиционирования в навигации морских дронов»

Исполнитель: Сальцберг Эдвард Валерьевич

Руководитель: кандидат технических наук, доцент

Попов Николай Николаевич

«К защите допускаю»

и.о. заведующего кафедрой: _____

кандидат географических наук, доцент

Фокичева Анна Алексеевна

«14» 06 2017 г.

Санкт-Петербург

2017

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Факультет Информационных систем и геотехнологий

Кафедра «Морские информационные системы»

Допустить к защите

Исполняющий обязанности заведующего кафедры МИС к.г.н.

Фокичева А.А. _____

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ
ПРЕЦИЗИОННОГО ТОЧЕЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В
НАВИГАЦИИ МОРСКИХ ДРОНОВ»**

Направление подготовки – 17.03.01 «Корабельное вооружение»

Профиль - «Морские информационные системы и оборудование»

Исполнитель:

Сальцберг Эдвард Валерьевич

Руководитель:

доцент кафедры МИС

к.т.н. Попов Николай Николаевич

Санкт-Петербург - 2017

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)**
Факультет ИС и ГТ

Кафедра Морские информационные системы

Направление подготовки 17.03.01 Корабельное вооружение

Профиль Морские информационные системы и оборудование

ЗАДАНИЕ

на дипломное проектирование

студента Сальцберга Эдварда Валерьевича

1. Тема дипломного проектирования: «Исследование возможностей применения систем прецизионного точечного позиционирования в навигации морских дронов».

2. Цели исследований:

Рассмотрение использования морских дронов в условиях арктических акваторий с применением систем прецизионного точечного позиционирования.

3. Перечень подлежащих разработке разделов по теме:

1. Анализ систем подводной навигации, применяемой в исследовательских и промышленных целях;
2. Применение системы прецизионного точечного позиционирования для определения местоположения автономных необитаемых подводных аппаратов;
3. Практические рекомендации по применению навигационных систем прецизионного точечного позиционирования в автономных необитаемых подводных аппаратах.

4. Основные ожидаемые результаты

Практические рекомендации по применению систем прецизионного точечного позиционирования в навигации морских дронов.

5. Состав технической документации проекта в соответствии с методическими указаниями.

Задание утверждено на заседании кафедры МИС «__» _____ 2016 года

Дата выдачи задания «__» _____ 2016 года

Зав. кафедрой МИС _____ (А.Г. Соколов)

Руководитель _____ (Н.Н. Попов)

Студент _____ (Э.В. Сальцберг)

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОДВОДНОЙ НАВИГАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕЛЯХ.....	14
1.1 Системы подводной навигации.....	14
1.2 Системы надводной навигации.....	23
Выводы.....	24
2 ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ПРЕЦИЗИОННОГО ТОЧЕЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ.....	26
2.1 Анализ физико-географических характеристик Баренцева моря.....	26
2.2 Методология систем прецизионного точечного позиционирования.....	34
2.3 Кинематическая систем прецизионного точечного позиционирования....	38
2.4 Применение систем прецизионного точечного позиционирования в системе буев.....	40
Выводы.....	42
3 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ТОЧЕЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ.....	43
Выводы.....	47
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	48

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- АНПА – автономный необитаемый подводный аппарат
- ТНПА – телеуправляемый необитаемый подводный аппарат
- СМП – Северный морской путь
- ТДП – точного дифференциального позиционирования
- УКВ – ультракороткие волны
- ГЛОНАСС – Российская Глобальная Навигационная Спутниковая Система
- PPP – Precise Point Positioning (прецизионно точечное позиционирование)
- GPS – системы глобального позиционирования
- ГНСС – глобальная навигационная спутниковая система
- СРНС – спутниковые радионавигационные системы
- РНС – радионавигационные системы
- INS – инерциальной навигационной системы
- DGPS – дифференциальная глобальная система позиционирования
- DVL – журнал скорости доплеровского сдвига
- CVL – коррелированный журнал скорости
- ADCP – акустический доплеровский токовый профилировщик
- LBL – длинный базовый уровень
- USBL – ультракороткая базовая линия
- КФ – фильтра Калмана
- ЕКФ – расширенный фильтр Калмана
- PF – частичный фильтр
- SLAM – алгоритмы одновременной локализации и сопоставления
- СМЛ – алгоритм параллельного сопоставления и локализации
- СДБЛ – стандартная длинная базовая линия
- ТАТ – специфическое время ответа
- СКБЛ – сверхкороткие базовые линии
- OWTT – определение времени одностороннего пути
- IF – ионосферно-свободная комбинация
- GIPSY – ГНСС Inferred Positioning System

OASIS – Orbit Analysis Simulation Software

TDP–Временнойзависимыйпараметр

PR2P–Псевдодальность данных для определения местоположения

GD2P–ГНСС данные для определения местоположения

IGS– IBM GlobalServices

MEMS–микроэлектромеханические системы

МНК –метод наименьших квадратов

RF–радиочастотныйканал

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Сегодня устойчивое развитие Арктического региона приобретает особое значение. Северный морской путь, как уникальная национальная транспортная коммуникация, является в настоящее время своеобразной «дорогой жизни», связывающей северные берега Российской Федерации по морям Северного Ледовитого океана и соединяющей европейские и дальневосточные российские порты, а также устья судоходных сибирских рек в единую общероссийскую транспортную систему, необходимую для обеспечения, развития и освоения Арктического региона Российской Федерации.

Развитие современных технологий высокоточного спутникового позиционирования и появление нового поколения робототехники имеет множество потенциальных сфер применения и является одним из наиболее перспективных способов освоения и дальнейшего исследования, в первую очередь, Арктического региона, обеспечивающее завоевание лидирующего экономического положения в мире за счет повышения экономической эффективности подводных работ.

Рассматривая современное состояние и значение арктических перевозок, рост их роли и объема, в первую очередь, внутреннего грузооборота, увеличение численности торговых, рыболовецких, научно-исследовательских и военно-морских судов в данном регионе, необходимо отметить возрастающую зависимость арктического судоходства от информационных технологий и современных морских навигационных систем, а, следовательно, уязвимость информационной безопасности объектов морской техники и морской инфраструктуры.

В связи с чем, надёжная защита арктических коммуникаций, в число которых входят морские транспортные средства и их оборудование, является одним из важных условий достижения успеха не только в области безопасности морской деятельности в Арктике.

В настоящее время, когда безопасность стала зависеть от всех составляющих ее элементов, когда нарушение к доступу одного из них, ведет к негативным последствиям для всей системы, огромную роль в развитии информационной безопасности играют не только программы и специальные информационные системы, непосредственно направленные на обеспечение необходимой конфиденциальности (защищенности от уничтожения, изменения, блокирования, а также иных несанкционированных действий), но и совершенствование навигационного обеспечения безопасности мореплавания на основе контроля точностных характеристик навигационно-информационной системы, т.е. применения систем прецизионного точечного позиционирования (определения точного местоположения) или иначе PrecisePointPositioning - дословно «позиционирование высокой точности» (далее – PPP).

Самопозиционирование подводного аппарата является особенно сложной задачей из-за отсутствия приема системы глобального позиционирования (GPS) или признаков в известных местоположениях, которые могли бы, в противном случае, быть использованы для вычисления координат. Таким образом, приложения автономных подводных аппаратов обычно требуют предварительного развертывания системы буев.

Наличие достоверной оценки своего местоположения имеет решающее значение для беспилотных аппаратов, поскольку неконтролируемые решения принимаются на основе оценки местоположения.

PPP является одним из методов получения высокоточных координат (в плане и по высоте) местности сантиметровой точности с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), в основе которого лежит применение точных апостериорных параметров орбит (эфemerид) и поправок к спутниковым часам.

Одним из главных преимуществ которого является отсутствие затрат на размещение дополнительных базовых станций, что, применительно к

Арктическому региону, позволит в несколько раз сократить расходы на его исследование.

Данный метод позволяет с помощью доступных технических средств, в том числе ориентированных на массовое применение (GPS-навигаторов), значительно повысить точность позиционирования местонахождения объекта в любой точке земной поверхности или окружающего пространства в непрерывном режиме, определения траектории его маршрута, скорости перемещения, времени нахождения в пути и т.д.

Следует отметить, что применение систем прецизионного точечного позиционирования в навигации морских дронов позволяет выполнение потенциально сложных для человека задач в научных, гражданских и военных целях. В океанологии, при проведении изыскательных работ по выявлению потенциала использования морских волн для строительства волновых электростанций, в поиске и оценке подводных месторождений и биоресурсов, в целях управления гражданскими и военными судами на маршрутах следования и портов, в технических средствах Гидрометцентра, в системе охраны акваторий занятыми гражданскими объектами – морские буровые платформы, припортовые сооружения, в технических средствах системы мониторинга морей и океанов Министерства обороны РФ, в технических средствах противолодочной обороны, в технических средствах автоматизированной системы охраны государственной границы морских территориальных вод, в технических средствах служащих «маркерами» для беспилотных судов, в технических средствах системы предупреждения цунами и других стихийных явлений, в технических средствах системы дистанционного выявления на дальних рубежах приближения (военных судов, дронов, роботов) условного противника, а также при создании высокоточного оружия флота.

Кроме того метод прецизионного точечного позиционирования, одновременно позволяет повысить информационную безопасность, в том числе и, в, части, качающейся изучения, освоения и использования

Северного Ледовитого океана, береговых шельфов и приарктических территорий.

Таким образом, метод PPP - является одной из составляющих национальной безопасности и оказывает серьезное влияние на защищенность национальных интересов нашей страны.

Повышение интенсивности движения на морских путях, увеличивающиеся размеры судов, рост скоростей движения, плавание в сложных метеорологических условиях и другие причины делают проблему обеспечения безопасности мореплавания наиболее приоритетной и актуальной.

Анализ особенностей и структуры системы обеспечения безопасности мореплавания показал, что навигационное обеспечение с использованием систем прецизионного точечного позиционирования является наиболее значимым.

Вместе с тем, несмотря на то, что спутниковые радионавигационные системы стали основными средствами морской радионавигации, обеспечивая непрерывные высокочастотные определения места подвижных объектов на всей поверхности Земли и околоземном пространстве, возможности применения систем прецизионного точечного позиционирования в навигации морских дронов используются не в полной мере.

Актуальность задач развития и внедрения методики PPP также подчёркивается тем фактом, что соответствующие работы ведутся в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» (ФЦП ГЛОНАСС-2020). Возможность определения местоположения непосредственно в общеземной системе координат придаёт методике особую практическую значимость в свете перехода к использованию геоцентрических систем координат в качестве государственных.

Степень научной разработанности темы исследования.
«Использование радиоволн в кораблевождении началось на рубеже XIX –

XX вв., однако до середины прошлого века судовой радиопеленгатор оставался практически единственным техническим средством радионавигации на судах морского флота. В период Второй мировой войны появились секторные радиомаяки, обеспечивающие пассивное определение пеленга с радиомаяка на судно с точностью до $0,1-0,3^*$ на дистанциях до 1000 морских миль и более.

Настоящим революционным прорывом стали теоретические и экспериментальные разработки советских ученых Л.И. Мандельштама, Н.Д. Папалекси, Е.Я. Щеголева, Э.М. Рубчинского, которые в первой половине 30-х годов доказали (и подтвердили экспериментально) возможность определения места корабля по изменению разности фаз радиоволн, принимаемых от двух береговых станций с известными координатами. В 1936 г. ими были созданы первые радионавигационные системы...

Третья четверть XX в. Стала эпохой развития и расцвета наземных РНС, построенных на различных принципах и обладавших различными технико-эксплуатационными характеристиками...».

Идея создания спутниковой навигации возникла в момент запуска в СССР первого искусственного спутника Земли, но разработка первых систем глобального позиционирования начались значительно позже в конце 60-х, начале 70-х гг. прошлого столетия. Первоначально разработки велись исключительно для военных целей.

Метод прецизионного точечного позиционирования представляет собой новый метод, появившийся в 1990-х годах, и включает в себя использование измерений от одного приемника ГНСС для получения точного местоположения без использования измерений от опорных станций.

Вопросы возможности применения систем прецизионного точечного позиционирования в морской навигации привлекают настоящее время большое внимание как отечественных, так и зарубежных ученых и специалистов-практиков.

В России работы по теме точного дифференциального позиционирования ведутся в рамках создания функциональных дополнений Единой системы координатно-временного и навигационного обеспечения (ЕС КВНО). Значительный вклад в формирование концепции ЕС КВНО внесли Ревнивых С. Г., Тестоедов Н. А., Данилюк А. Ю., Донченко С. И., Долгов Е. И., Демьянов Г. В., Макаренко Н. Л., Пешехонов В. Г., Красовский П. А., Бутенко В. В. и другие. Авторами работ на русском языке и переводов с английского, посвящённых дифференциальному методу в ГНСС, и в частности методике ТДП, являются Антонович К. М., Виноградов А. В., Войтенко А. В., Дворкин В. В., Глухов П. Б., Голубев А. Н., Жигулин А. Ю., Карутин С. Н., Першин Д. Ю., Подкорытов А. Н., Щербаков А. С. и другие. Значительный вклад в создание и развитие методики точного дифференциального позиционирования внесли следующие зарубежные авторы: Bisnath S. B., Burgan J., Collins P., Dodson A. H., Geng J., Hroux P., Jefferson D. C., Jekeli C., Kouba J., Lahaye F., Langley R. B., Laurichesse D., Teferle F. N., Watkins M. M., Webb F. H., Zumberge J. F. и другие. Несмотря на возросший интерес к данной теме и активизацию работ по совершенствованию методики ТДП, задача повышения оперативности определения местоположения остаётся актуальной.

Следует отметить, что в связи с тем, что данные технологии разрабатывались первоначально для применения в военной сфере и до настоящего времени являются технологиями двойного назначения, публикации этих исследований в открытых источниках информации допускаются выборочно и крайне редко.

Данная работа является комплексной. Структура комплексной работы представлена на рисунке 1.

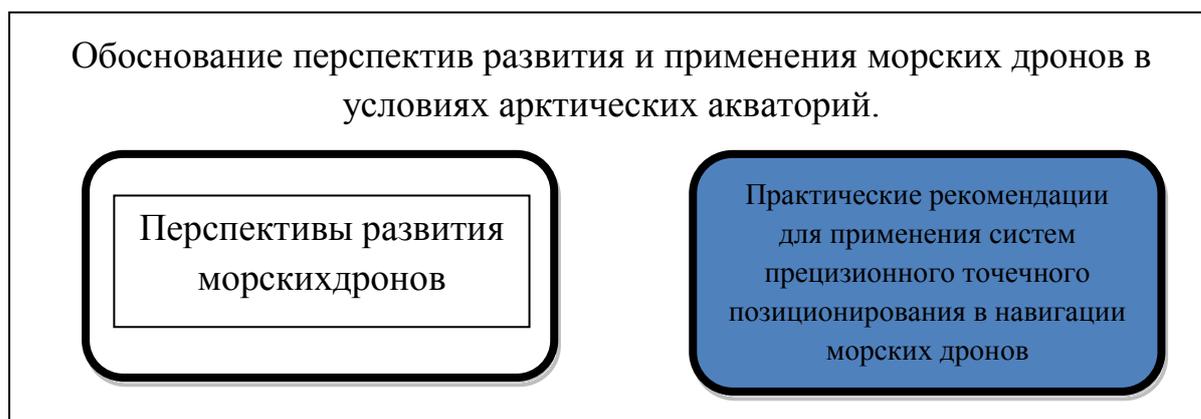


Рисунок 1 – Структура комплексной работы

Объектом исследования являются морские дроны.

Предмет исследования настоящей работы – системы позиционирования морских дронов.

Цель исследования – рассмотрение вопросов использования морских дронов в условиях арктических акваторий с применением систем прецизионного точечного позиционирования.

Для достижения данной цели в процессе исследования были решены следующие **задачи**:

- проведен анализ систем подводной навигации, применяемой в исследовательских и промышленных целях;
- исследованы вопросы применения системы прецизионного точечного позиционирования для определения местоположения автономных необитаемых подводных аппаратов;
- разработаны практические рекомендации по применению навигационных систем прецизионного точечного позиционирования в автономных необитаемых подводных аппаратах.

Методологическую основу исследования составили диалектический метод научного познания и общенаучные методы исследования: логической обработки материалов, статистический, системно-структурный, программно-целевой метод и др.

Теоретическая основа исследования. Общетеоретическую основу дипломного исследования составили монографии, учебные пособия, лекции,

научные статьи, доклады, тезисы, диссертации ученых в области прецизионного точечного позиционирования в навигации и др.

Нормативно-правовой базой исследования послужили: Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы», утвержденная постановлением Правительством Российской Федерации 3 марта 2012 года №189, законы и другие нормативные и правовые акты, регламентирующие эксплуатацию навигационных систем прецизионного точечного позиционирования.

Эмпирическую базу исследования составили:

- отчетные, информационно-аналитические и справочные материалы ВМФ России, Минобороны России, Федерального агентства морского и речного транспорта размещенные на их официальных сайтах;

- публикации:

1. Абрамов В.М., Попов Н.Н., Саноцкая Н.А., Шнеерсон Е.З., Соловаров Р., Кочешков Н.В., Кумпан С.А., Сальцберг Э.В., Попова А.Н., Трунин С.В. «Разработка и создание малобюджетных исследовательских подводных дронов».

2. Сальцберг Э.В., Кумпан С.А. «Исследование возможности применения систем прецизионного точечного позиционирования в навигации морских дронов».

1 АНАЛИЗ СИСТЕМ ПОДВОДНОЙ НАВИГАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЦЕЛЯХ.

В данном разделе рассмотрены системы подводной и надводной навигации, обычно используемые в подводных аппаратах. В нем изложены их конкретные характеристики и показано, как несколько сенсоров используются совместно для определения местоположения аппарата. Важно отметить, что наш взаимный навигационный подход не заменяет какие-либо из этих инструментов, но добавляет "виртуальный" сенсор путем объединения измерений своих собственных физических сенсоров и от других аппаратов.

В отличие от воздушных или наземных беспилотных летательных аппаратов, АНПА сталкиваются с уникально сложной навигационной проблемой из-за отсутствия высокоточной спутниковой навигации под водой. Разумеется, для дистанционно управляемых транспортных средств и ТНПА информация о дополнительной навигации (положение, скорость) может быть отправлена на транспортное средство по волоконно-оптическому кабелю. Но особенно для беспилотных подводных аппаратов и для АНПА это практически невозможно реализовать на практике. Следовательно, при погружении эти транспортные средства должны перемещаться с использованием синтеза разных методов. Учитывая основные области применения АНПА, точность навигации менее важна для океанографических съемок по сравнению с батиметрическими и подводными техническими средствами, а также военными применениями.

1.1 Системы подводной навигации

В литературе существуют три основных метода навигации АНПА: мертвая учетная и инерциальная навигация, акустическая навигация и методы геофизической навигации.

Первый метод основан преимущественно на использовании инерциального навигационного оборудования (например, инерциальной навигационной системы), которая в финансовом отношении стала возможной, особенно после создания технологии микроэлектромеханических систем.

Поскольку погрешности измерений инерциального навигационного оборудования монотонно возрастают и неограничены, другие вспомогательные средства (например, дифференциальная глобальная система позиционирования для положения, журнал скорости доплеровского сдвига или коррелированный журнал скорости для скорости движения на земле; датчики давления для глубины, акустический доплеровский токовый профилировщик для текущей скорости и т. д.) должны быть интегрированы для навигационного средства.

В принципе, рекомендуется регулярно получать обновления измерений DGPS для высокоточной навигации АНПА. Однако, к сожалению, это может быть нецелесообразно, особенно в подледных приложениях или в тактико-критических военных приложениях. Более того, поскольку CVL и DVL являются устройствами, основанными на феномене доплеровского сдвига, они в основном работают с отражениями своих собственных передаваемых сигналов (от морского дна). Следовательно, для эффективного использования этих устройств АНПА должен быть достаточно медленным (чтобы иметь возможность принимать отраженный сигнал); и АНПА не будет находиться очень далеко (порядка 200-300 метров) от морского дна.

Акустическая навигация основана на использовании акустических сигналов транспондера для АНПА для определения его положения. Наиболее распространенными методами являются длинный базовый уровень, который использует, по меньшей мере, два широко разделенных транспондера, установленных обычно на морском дне; и ультракороткая базовая линия, которая использует GPS-откалиброванные транспондеры на сопроводительном поверхностном сосуде. Оба метода имеют ограниченный

диапазон (около 10 км для отдельных LBL, в глубокой воде - около 4 км, тогда как менее 0,5 км в мелководье для сетей USBL). Поскольку LBL требует установки маяков, его применимость ограничена миссиями, выполняемыми в фиксированных положениях (например, защита гавани). Кроме того, установка и обслуживание маяков - сложные и дорогостоящие операции. USBL может не применяться в некоторых военных приложениях из-за тактических ограничений, поскольку для этого требуется сопутствующее поверхностное судно.

Геофизическая навигация основана на получении оценки положения с помощью наблюдаемых физических характеристик (например, по существующим картам области или по построению таких карт во время миссии). Несмотря на то, что этот метод обеспечивает лучшую точность по сравнению с другими технологиями, он требует дорогостоящих полезных нагрузок с высоким потреблением мощности (например, оптических датчиков, камер) и большой вычислительной мощности. Кроме того, они больше подходят для миссий, выполняемых в ранее исследованных районах.

Таким образом, конфигурация навигационного датчика АНПА должна быть выбрана в соответствии с потребностями миссии, и должна быть определена соответствующая архитектура навигационного решения. Обобщенная навигационная архитектура АНПА, основанная на работах Bovio E., Cecchi D., и Varalli F., показана на рис 2.

Как видно на схеме, необходимо объединить измерения различных датчиков, чтобы оценить положение АНПА вместе с ошибками.

Наиболее распространенным методом является использование известного фильтра Калмана, который является оптимальной байесовской оценкой состояния системы, если она является линейной, марковской и гауссовской неопределенностями. Для АНПА система не могла быть смоделирована линейно; следовательно, для аналитической или статистической линеаризации модели системы должны использоваться расширенный фильтр Калмана.

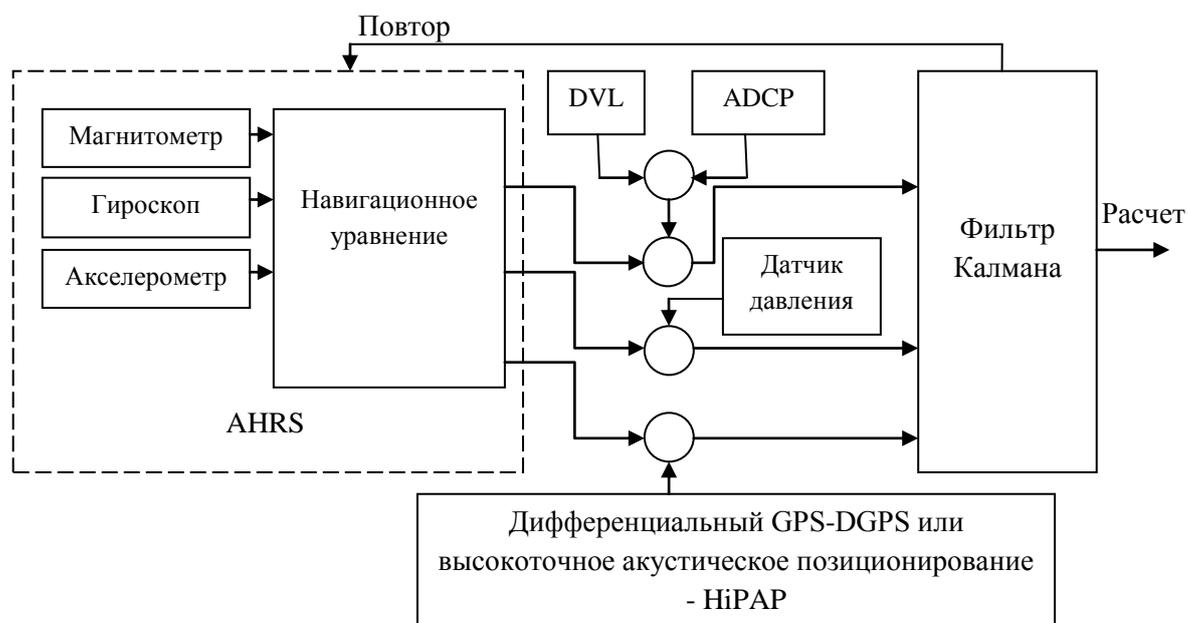


Рисунок 2- Обобщенная навигационная архитектура для АНПА

Для этой цели также может применяться частичный фильтр. Помимо этого он применим для случаев, когда неопределенности являются негауссовыми. Но следует отметить, что его реализация требует больших вычислительных мощностей.

Формы KF и PF применимы для инерциальной навигации. Для приложений акустической и геофизической навигации могут быть использованы алгоритмы одновременной локализации и сопоставления и параллельного сопоставления и локализации.

Анализ априорных навигационных ошибок для АНПА затруднен, поскольку навигационная ошибка плотно коррелирует с характеристиками миссии (например, скорость передвижения, продолжительность миссии т.д.), а также зависит от возможностей навигационного датчика. По этой причине требуется выполнение высокоточного моделирования с хорошо проработанными сценариями конкретной миссии и получение по нему оценок навигационной ошибки. Однако, в качестве отправной точки могут быть использованы оценки грубой ошибки, существующие в литературе:

-для ближних миссий на расстоянии до 10 км, откалиброванная INS, может обеспечить достаточную точность для исследовательских миссий независимо от траектории передвижения АНПА.

-для дальних миссий(до 100 км) путь, пройденный АНПА, оказывает большое влияние на точность используемой навигационной системы. Несколько геофизических методов используются для коррекции инкрементных ошибок позиционирования АНПА при их возвращении в ранее посещенную область. Это выполняется для любого метода, который использует карту, составленную в ходе миссии. Если путь АНПА содержит много точек пересечения, то такие методы использования карты будут эффективны.

-если АНПА следует линейным путем или одной большой петлей, геофизические методы обеспечивают лишь небольшое улучшение благодаря последовательной регистрации ориентиров, и не будут существенно улучшать точность навигации во время миссии.

Глубинный сенсор

Все подводные аппараты оснащены датчиком давления, который позволяет им определить их абсолютную глубину с высокой точностью и высокой скоростью обновления. В результате все другие подводные навигационные системы используются только для определения 2D позиции (т.е. нахождения долготы и широты), и все проблемы подводного позиционирования, связанные с аппаратом, формулируются в 2D.

Магнитный компас

Как и датчик давления, компас является частью основного комплекса навигационных сенсоров каждого подводного аппарата, поскольку он является недорогим устройством с низким энергопотреблением. Он позволяет определять 3D-вектор локального магнитного поля. Перед вычислением направления по вектору магнитного поля, необходимо тщательно калибровать компас каждый раз, когда изменяется зона работы аппарата, так как разность между ориентацией 3D-вектора магнитного поля и

направлением истинного севера (называемая "вариацией") зависит от географического положения. В дополнение к медленному пространственному изменению, существуют и сильно локализованные «магнитные аномалии». Выходной сигнал компаса также зависит от его положения на АНПА, поскольку электрические токи создают магнитные поля, которые не могут быть различимы от магнитного поля Земли.

GPS

GPS способен обеспечить абсолютную информацию о положении на открытом воздухе наземных роботов, а также беспилотных летательных аппаратов, но сильное поглощение электромагнитных волн в морской воде делает невозможным использование GPS погружными АНПА. Тем не менее, почти все подводные аппараты сегодня оснащены приемником GPS, так как он может быть использован для определения местоположения перед началом миссии или во время прерывистого всплытия.

Расходомер

Расходомер состоит из трубы, как правило, смонтированной в соответствии с главной осью транспортного средства и открытой для окружающей воды на обоих участках. Он содержит пропеллер, который вращается с помощью проточной воды, проходящей через трубку по мере движения аппарата.

Метод буев

Наиболее часто используемый способ получения абсолютной информации о положении под водой - посредством использования буев. Эти буи находятся в известных местах и АНПА получает дальность и / или азимут к нескольким из них, а затем вычисляет свою позицию через трилатерацию или триангуляцию. На основании расположения приемопередатчиков можно выделить три различных базовых системы.

Стандартная Длинная Базовая линия

Типичная конфигурация стандартной длинной базовой линии показана на Рисунке 3-а. Два или более буев разворачиваются по всему периметру

зоны, в которой АНПА будет работать. Эти буи закрепляются и плавают на поверхности или, в особенности в более глубоких водах, в нескольких метрах над морским дном. Каждый блок принимает акустические запрошенные пинги от общего канала приема. После получения запросного пинга от АНПА, каждый блок ждет уникальное специфическое время ответа t_i^{TAT} , а затем посылает в ответ пинг на своем отдельном канале передачи. АНПА затем получает ответный пинг. Канал передачи, а также ТАТ различны для каждого блока. Уникальный ТАТ гарантирует, что два буя не будут смешиваться при передаче в одно время, и с использованием различных частот передачи буи обеспечивают способ определения для АНПА, из какого блока был отправлен ответный пинг. Разность времен Δt_i между отправкой запросного пинга и получением ответа может быть использована для определения времени одностороннего пути t_i^{owtt} .

$$t_i^{owtt} = \frac{\Delta t_i - t_i^{TAT}}{2} \quad (1)$$

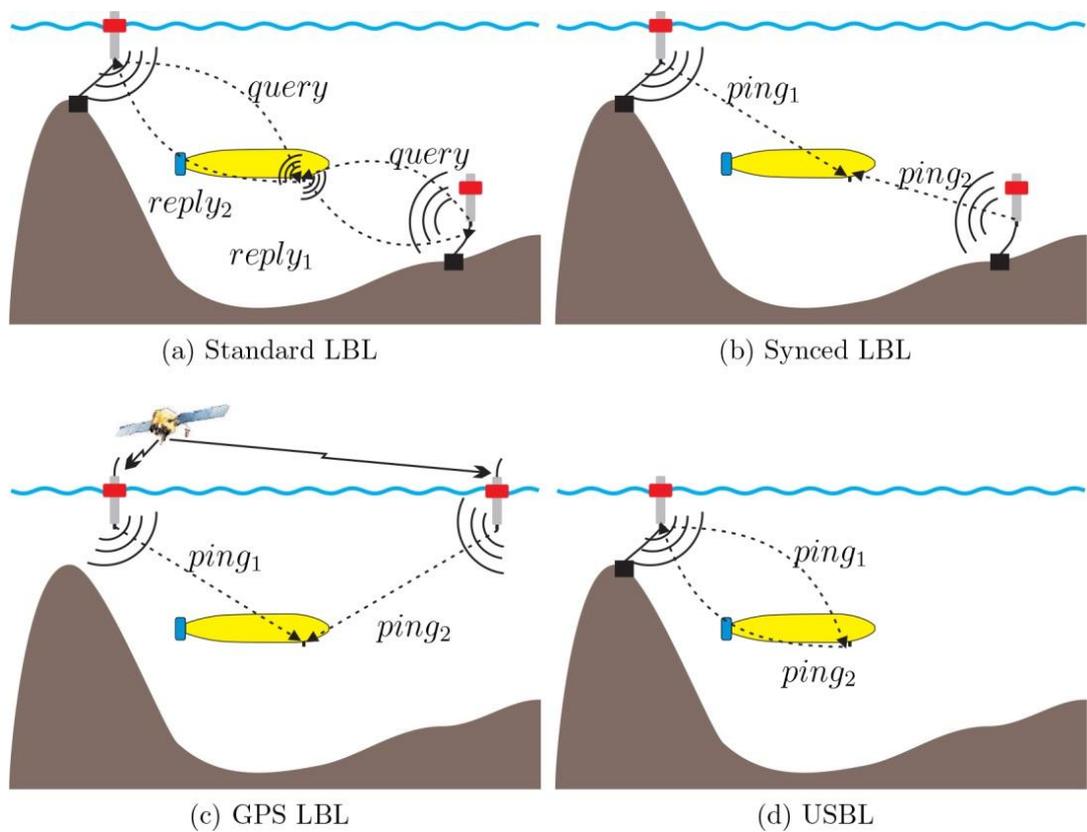


Рисунок 3 - Методы подводного позиционирования, основанные на буях

Расстояние d_i между i -буем и АНПА выражается соотношением:

$$d_i = \frac{c}{t_i^{owtt}} \quad (2)$$

Где скорость света c может быть как априорно заданной в программном обеспечении величиной, так и результатом измерений на борту. С помощью измерений дальности до нескольких буев и зная их позиции, хранящиеся в аппарате, куда они были введены перед развертыванием, АНПА теперь трилатерируют (определяют местоположение подвижного объекта одновременно тремя станциями сети) свою позицию.

Максимальное возможное расстояние между АНПА и буем, а также точность позиционирования зависят от диапазона частот, используемого для запросного и ответного пингов. Дальнедействующие LBL-системы, использующие полосу частот работы 12 кГц на расстояниях до 10 км, могут обеспечить определение абсолютной позиции с ошибкой 1 - 10 м. Системы LBL малого радиуса действия, использующие полосу частот около 300 кГц, позволяют достичь сантиметровой точности, но максимальный диапазон ограничен 100 м. Указанные ошибки предполагают, что большие выбросы были отфильтрованы.

Варианты стандартной длинной базы:

Стандартные системы LBL, такие как описанные выше, не очень хорошо подходят для больших групп, так как только один АНПА одновременно может обращаться к сети буев и получать обновленную информацию о местоположении. Таким образом, интервал обновления позиции возрастает с увеличением числа транспортных средств. Новые системы LBL вроде той, которая недавно была разработана ACSA и показана на Рисунке 3б, синхронизировали часы буев и приемопередающих блоков АНПА. Буи транслируют пинг, содержащий уникальный идентификатор, через определенные промежутки времени. Когда АНПА получает этот пинг,

известный график трансляции маяка и время синхронизированных часов гарантируют, что аппарат знает, когда пинг был отправлен и может непосредственно вычислить ОВТТ. Синхронизированных часов тем самым устраняют необходимость запросных пингов и позволяют всем аппаратам в радиусе действия буев получать дальность до вещающих буев. В результате интервал пинга не зависит от количества аппаратов, опирающихся на сеть буев.

Еще одним усовершенствованием по сравнению с обычными LBL является система, изображенная на Рисунке 3-с. Опираясь на установку на Рисунке 3-б, буй теперь передает свои позиции GPS вместе с уникальным идентификатором. Как и в случае системы, описанной ранее, АНПА не нуждается в отправке запросов к буям. С позициями буев, внедренными в пинг, буй может свободно плавать, и не нужно сохранять их координаты в АНПА перед развертыванием.

Сверхкороткие базовые линии

Другой вариант навигационных систем, основанных на системе буев,- СКБЛ (Рисунок 3-d). Здесь буй имеет тот же вид, как и в стандартной системе СДБЛ, но приемопередатчик на АНПА содержит несколько приемных элементов, которые очень близки друг к другу. После запроса буев ответный пинг захватывается всеми принимающими элементами. Разность фаз между сигналами, поступающими из различных приемных элементов, позволяет АНПА вычислить азимут к бую. В сочетании с положением радиомаяка, хранящимся в АНПА, и расстоянием d , полученным из ОВТТ, аппарат может вычислить свое абсолютное положение, используя ответ только от одного маяка.

Современные системы буев на основе систем, таких как те, которые показаны на рисунках 3-б, 3-с и 3-d, значительно уменьшили усилия, прикладываемые для предварительного развертывания, по сравнению с ранними системами буев, такими как стандартный LBL. Однако все системы на основе буев ограничивают рабочую зону для АНПА да многоугольника,

ограниченного буями, или, как в случае СКБЛ, до радиуса охвата одного буя. Таким образом, навигация на основе буев возможна только для рабочих зон размера $O(10 \text{ км}^2)$.

Метод прецизионного точечного позиционирования представляет собой новый метод, включающий в себя использование измерений от одного приемника ГНСС для получения точного местоположения без использования измерений от опорных станций. Такое улучшение достигается за счет использования наборов поправок к наблюдениям, таких как прецизионные спутниковые эфемериды и поправки спутниковых часов, полученные из сети станций мониторинга (например, службы IGS), расположенных по всему миру. PPP позволяет добиться глобального покрытия при применении в морских условиях, расширяя возможности прецизионных методов позиционирования в отдаленных районах, и имеет потенциал для снижения затрат и технических потребностей в морской разведке.

1.2 Системы надводной навигации

В настоящий момент во всем мире только две системы широко используются и полноценно функционируют. Это Система Глобального Позиционирования США GPS и Российская Глобальная Навигационная Спутниковая Система ГЛОНАСС.

Большинство методов прецизионного позиционирования ГНСС, способных обеспечить сантиметровую точность, основаны на дифференциальных методах определения местоположения. Такие методы должны работать в непосредственной близости от одной или нескольких базовых станций в пределах нескольких десятков километров, и требуют выполнения одновременных наблюдений на опорных и подвижных станциях. В условиях морских акваторий это ограничивает возможную рабочую зону прибрежной зоной.

Позиционирование с помощью ГНСС может быть выполнено одним из трех способов: точечным (абсолютным) позиционированием,

дифференциальным (относительным) позиционированием или прецизионно точным позиционированием.

Абсолютное позиционирование подразумевает определение координат одним приемником (точечное позиционирование). Дифференциальное или относительное позиционирование – это работа как минимум пары приемников, из которых один – базовый, располагающийся на пункте с известными координатами.

Выводы: системы подводной навигации АНПА используют три основных метода:

-мертвая учетная и инерциальная навигация – основана на использовании инерциального навигационного оборудования, погрешности измерений этого метода монотонно возрастают и неограничены, но для эффективного использования этих устройств АНПА должен быть достаточно медленным

-акустическая навигация - основана на использовании акустических сигналов транспондера для АНПА для определения его положения. Наиболее распространенными методами являются длинный базовый уровень и ультракороткая базовая линия. Оба метода имеют ограниченный диапазон и требуют установки маяков, что является довольно сложной и дорогостоящей операцией

-метод геофизической навигации - основан на получении оценки положения с помощью наблюдаемых физических характеристик. Этот метод обеспечивает лучшую точность по сравнению с другими технологиями, но он требует дорогостоящих полезных нагрузок с высоким потреблением мощности. Кроме того, они больше подходят для миссий, выполняемых в ранее исследованных районах.

Элементы системы подводной навигации включают в себя: глубинный сенсор, магнитный компас, GPS-датчики и расходомер.

Системы надводной навигации используют в основном две системы позиционирования: ГЛОНАСС и GPS

Позиционирование с помощью ГНСС может быть выполнено одним из трех способов: точечным (абсолютным) позиционированием, дифференциальным (относительным) позиционированием или прецизионно точечным позиционированием.

2 ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ТОЧЕЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Баренцево море было выбрано в качестве места, где будет использоваться наша система, и характеристики которого будут влиять на метод позиционирования для АНПА.

2.1 Анализ физико-географических характеристик Баренцева моря

Баренцево море относится к морям Северного ледовитого океана и имеет площадь в 1360 тысяч квадратных километров. Море находится в пределах материковой зоны, является относительно неглубоким – его наибольшая глубина составляет – 548 метров. Средняя глубина моря – 199,3 метра.

Береговая линия и рельеф дна Баренцева моря. Баренцево море целиком расположено за Полярным кругом и ограничено с севера архипелагами Шпицбергена и Земли Франца Иосифа, с запада — островом Медвежьим, с востока—Новой Землей, с юга—материком (от мыса Нордкап до Югорского шара). По своей форме оно напоминает ромб, меридиальная ось которого имеет 1300—1400 км, а широтная 1100—1200 км.

Протяжённость береговой линии черты Баренцева моря – 6645 километров, а сама она достаточно изрезанная фьордами, заливами и бухтами. На западе, от моря Нордкап до полуострова Среднего, к морю подходит гористый берег Норвегии, восточнее, до острова Кильдин, прибрежные горы становятся ниже, еще восточнее берег представляет собой волнистую равнину с отвесными скалами. Для юго-восточной части моря характерны низменные пологие берега. Западный берег Новой Земли на его южном участке, до Горбовых островов, невысокий всхолмленный, севернее к морю подходят ледники Новоземельских гор, некоторые из которых стекают

в море. Ледяные берега можно встретить также на Земле Франца-Иосифа и на Шпицбергене.

В Баренцевом море много островов. Однако они не велики и расположены вблизи берегов или других, более крупных островов, и сгруппированы в небольшие архипелаги. Геологическое строение островов и побережья, и особенности рельефа дна и грунтов позволяют сделать вывод, что в море происходили неоднократные тектонические движения и ледниковые процессы.

Берега Баренцева моря в юго-западной части фиордового типа — высокие, крутые, сложенные из древнейших кристаллических пород. Таковы берега Финмаркена в Норвегии. Мурманские берега России также фиордового типа. От мыса Канин Нос на восток берега отлогие, низкие.

Южная часть моря на дне имеет глубины менее 200 метров и отличается выравненным характером (рисунок 4).

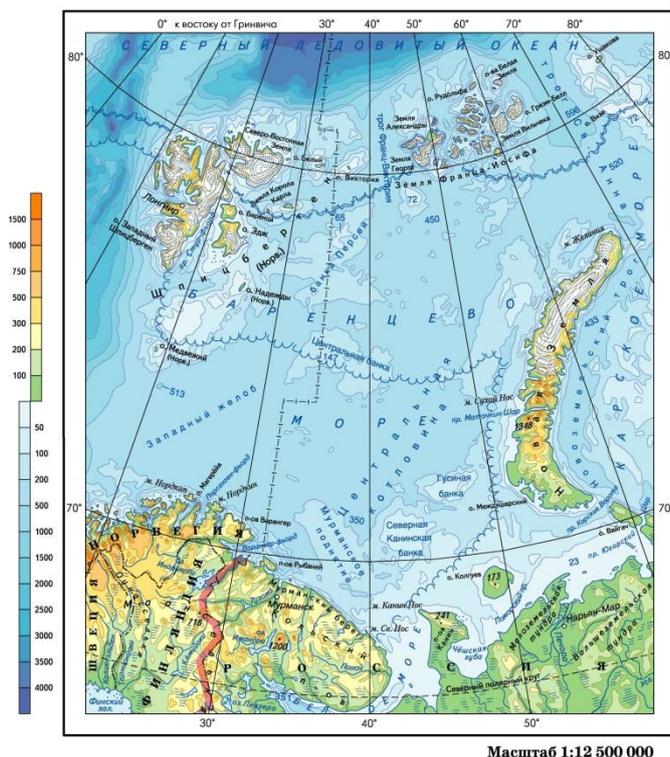


Рисунок 4 – Карта Баренцева моря.

Для рельефа дна Баренцева моря сильная расчлененность. На расстояниях десятков километров перепады глубин могут составлять 50 - 100 метров. Всё море можно поделить на равнины (Центральное плато),

возвышенности (Центральная, Персея - минимальная глубина 63 метров), впадины (Центральная - максимальная глубина 386 метров) и желоба (Западный - максимальная глубина 600 метров, Франц - Виктория - 430 метров). Южная часть моря на дне имеет глубины менее 200 метров и отличается выравненным характером.

Наиболее глубокие места расположены в западной части моря. Здесь же и находится максимальная глубина. Самый глубокий желоб находится между материком и Медвежьим островом. Глубины здесь достигают 500 метров. Второй желоб проходит между островами Медвежьим и Шпицбергеном. Однако глубины здесь меньше. Третий желоб находится между Шпицбергеном и Землей Франца Иосифа и четвертый — между Землей Франца Иосифа и Новой Землей. В середине моря находится, кроме того, обширная впадина с глубинами около 400 метров.

Кроме крупных структурных форм донного рельефа на глубинах меньше 200 м существуют многочисленные мелкие неровности дна, что связано с влиянием гидрологических элементов. С этим же связано и распределение грунтов в море. Большая часть дна Баренцева моря (северная половина, Центральная впадина, Новоземельский желоб) покрыта песчаным илом. Прибрежные склоны и склоны Мурманской и Рыбачьей банок и Центральная возвышенность покрыты илистым песком. На поверхности Медвежьей и Шпицбергенской банок имеется песок. Юго-восточную часть моря занимают илистые отложения, это объясняется слабой подвижностью вод в этом районе и переносом реками и льдами мелкого материала. В Норкапском желобе наблюдаются зоны размыва, скопление валунов и участки скалистого дна.

Из рек, впадающих в Баренцево море, наиболее значительная — Печора. Более мелкими реками являются Печенга, Титовка, Западная Лица (Мотовский залив), Тулома, Кола (Кольский залив), Индига, Пеша, Чеша и другие (список всех рек бассейна Баренцева моря).

Из заливов наиболее крупными являются Мотовский, Кольский, из губ — Териберская, Чешская с внутренней, более мелкой Индигской губой.

Грунты Баренцева моря в основном не океанического, а терригенного происхождения — пески, илистые пески, песчанистые илы. Кроме того, в Баренцевом море имеются грунты автохтонного происхождения. В западной части Баренцева моря грунты плотные, в юго-западной части отложился спиккулозый ил, в юго-восточной части находятся желтые грунты — результат выноса рек, в северной — коричневые грунты, содержащие много железа и марганца.

Гидрология. Для Баренцева моря большое значение имеет водообмен с океаном. Воды Гольфстрима, выходящие из Мексиканского залива, дают начало теплomu атлантическому течению, ветви которого проникают в Норвежское и Баренцево моря. На границе Баренцева моря, к югу от Медвежеостровской банки, атлантическое течение распадется на шпицбергенскую и нордкапскую ветви. Шпицбергенская ветвь, более мощная, направляется далее в виде глубинного (покрытого арктической водой) течения в полярный бассейн, где образует теплый промежуточный слой. Этот слой был впервые обнаружен Нансеном и исследован папанинцами во время их дрейфа на льдине в 1937 г.

Воды Нордкапской ветви поступают в Баренцево море между Медвежьим островом и мысом Нордкап. Эта ветвь в связи с особенностями рельефа дна распадается на 4 струи. Особенное значение имеют две южных струи, влияющие на режим вод южной части моря. Прибрежная, мурманская, ветвь проходит вдоль берегов Мурмана, направляясь от Нордкапа к полуострову Канину. Вторая ветвь проходит севернее и воды ее достигают Новой Земли. Такая схема течений была установлена Н. М. Книповичем в 1906 г. Позже, в тридцатых годах, в эту схему другими российскими исследователями были внесены некоторые дополнения, не меняющие суть схемы, установленной Н. М. Книповичем.

Теплые 4—12°C (рисунок 5,6) и вместе с тем более соленые 34,8—35,2 ‰ (рисунок 7,8) атлантические воды, поступая в Баренцево море и встречаясь с местными более холодными и менее солеными водами, образуют так называемый полярный фронт. При встрече вод разного физического состава атлантические воды охлаждаются и опускаются вниз. Мощная вертикальная циркуляция обуславливает обильную аэрацию глубинных вод и вынос в поверхностные слои питательных органических веществ. В результате биологическая продуктивность в полосе полярного фронта оказывается особенно высокой.

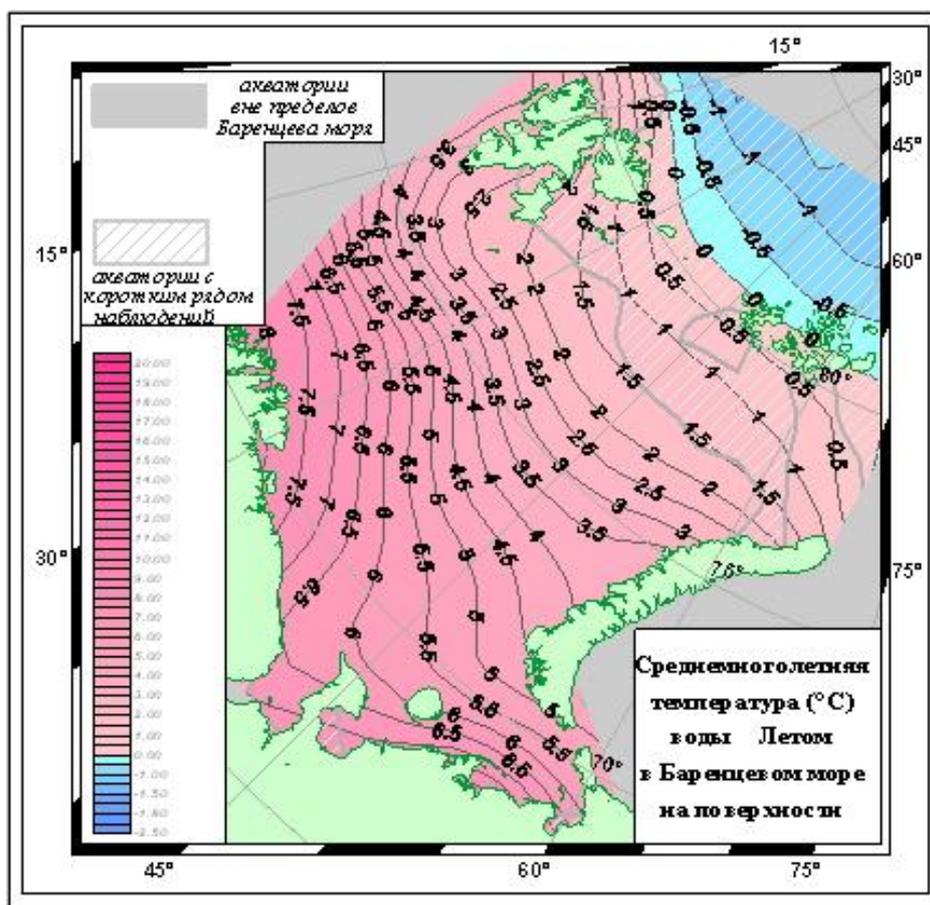


Рисунок 5 – Среднегодовья температура (°C) воды летом в Баренцевом море.

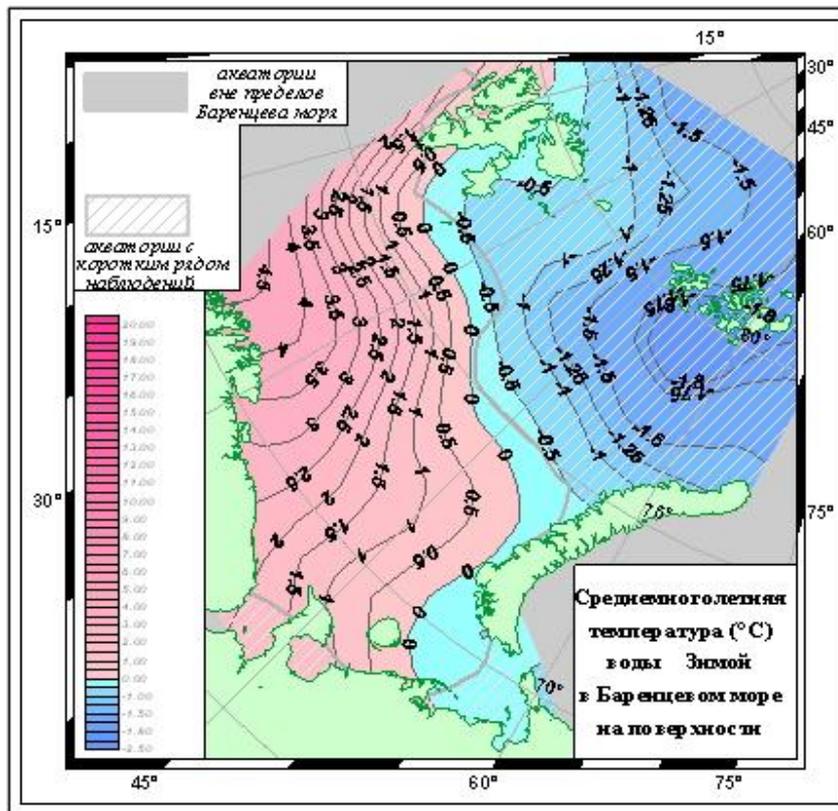


Рисунок 6 – Среднегодовая температура ($^{\circ}\text{C}$) воды зимой в Баренцевом море.

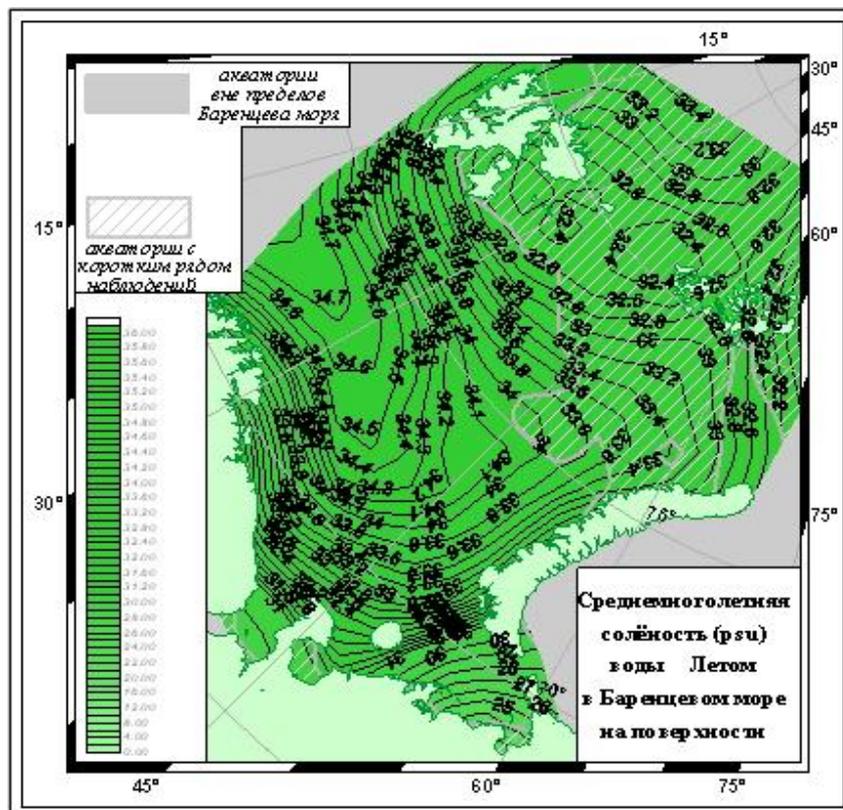


Рисунок 7 – Среднегодовая Соленость (psu) воды летом в Баренцевом море.

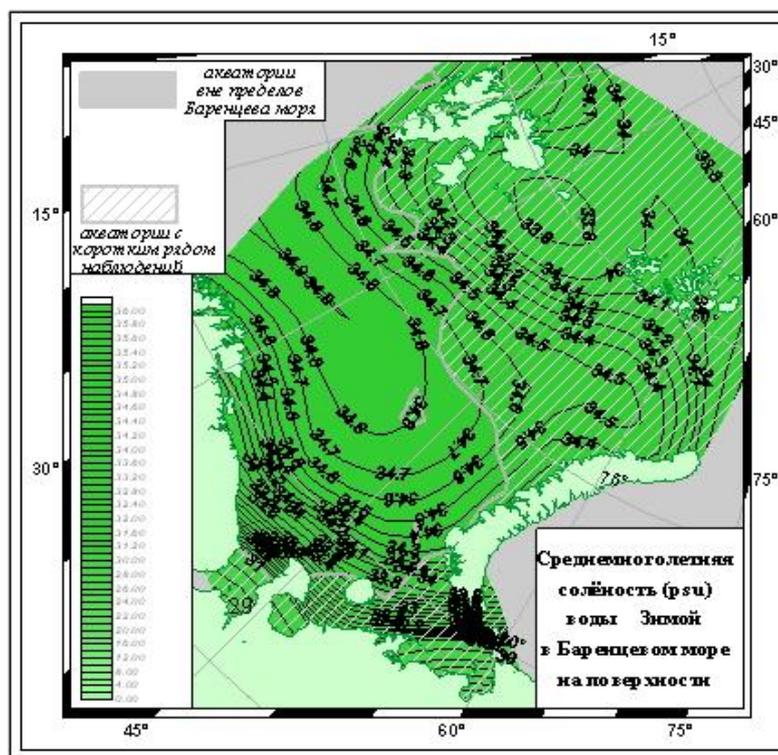


Рисунок 8 – Среднегодовая Солёность (psu) воды зимой в Баренцевом море.

По данным Л. А. Зенкевича, биомасса бентоса достигает в этих районах 600—1000 г на 1 м², уменьшаясь вне этих районов до 20—50 г на 1 м².

Баренцево море, являясь переходным между Норвежским — северо-бореальным и Карским — арктическим морями, характеризуется соответственной температурой: в западной части даже зимой температура воды положительная от поверхности до дна. В средней части северной половины моря даже летом прогревается только тонкий поверхностный слой, а глубже вода имеет отрицательную температуру. В южной половине средней части на глубине 200—250 м вода прогревается летом до 1,5—2,0°. В северо-восточной части моря летом и у поверхности температура воды остается низкой. У берегов Мурмана поверхностная температура в августе, в период максимального прогрева, достигает 12° и даже несколько более (рисунок 5). Самая низкая температура в Баренцевом море на глубине 50—75 м.

Северная и восточная части моря значительную часть года покрыты льдом. Юго-западная часть не замерзает, вследствие чего Мурманское побережье зимою доступно для плавания судов.

Ледовое покрытие. Баренцево море единственное из арктических морей, которое никогда полностью не замерзает (рисунок 9). Ежегодно около 1/4 его поверхности не покрывается льдом в течение круглого года. Это объясняется притоком в его юго-западную часть теплых атлантических вод, не позволяющих воде охлаждаться до температуры замерзания и служащих своеобразным барьером для льдов, надвигающихся с севера. Вследствие слабых течений из Карского моря в Баренцево принос льдов оттуда незначителен. Таким образом, в Баренцевом море наблюдаются льды местного происхождения. В центральной части и на юго-востоке моря — это однолетние льды, которые образуются осенью и зимой, а весной и летом растаивают. Лишь на крайнем севере и северо-востоке, куда спускаются отроги океанического ледяного массива, встречаются старые льды, в том числе и арктический пак.

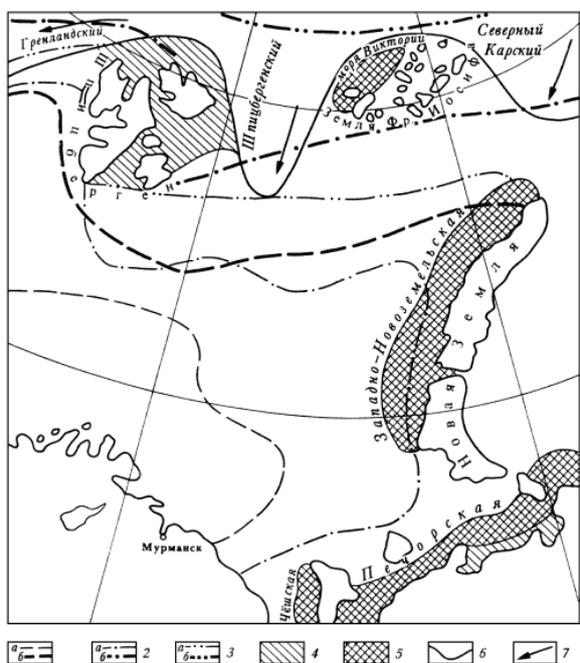


Рисунок 9 - Ледовое покрытие Баренцева моря.

1 — максимальная в феврале (а) и августе (б); 2 — средняя в феврале (а) и августе (б); 3 — минимальная в феврале (а) и августе (б); 4 — припой; 5 — полыньи; 6 — граница отрогов ледяных массивов; 7 — преобладающее направление дрейфа.

Припой в Баренцевом море развит слабо. Сравнительно небольшие площади он занимает в Канинско-Печорском районе и у Новой Земли, а у Мурманских берегов встречается только в губах. В юго-восточной части моря и у западных берегов Новой Земли всю зиму сохраняются заприпойные полыньи. Наибольшее распространение льдов в море наблюдается в апреле. В этом месяце они покрывают до 75% его площади. Толщина ровного морского льда местного происхождения в большинстве районов не превышает 0,7—1,0 метров. Наиболее толстые льды (до 150 сантиметров) встречаются на северо-востоке, в районе мыса Желания.

В весенне-летнее время однолетние льды быстро тают. В мае южные и юго-восточные районы освобождаются ото льдов, а к концу лета почти все море очищается ото льдов, за исключением районов, прилегающих к Новой Земле, к Земле Франца-Иосифа и восточным берегам Шпицбергена. Ледовитость Баренцева моря изменяется от года к году, что связано с различной интенсивностью Нордкапского течения, характером крупномасштабной атмосферной циркуляции, общим потеплением или похолоданием Арктики в целом.

2.2 Методология системы прецизионного точечного позиционирования.

Мы начнем с рассмотрения общей модели наблюдений для ГНС псевдодальности и измерения несущей фазы, как показано в формуле (1) и (2), которые встречаются во многих учебниках. Рассмотрим:

$$\rho_i^j = R_i^j + c\delta t_i + T_i^j + I_i^j + c\delta t^j + \epsilon_\rho^j, (3)$$

$$\Phi_i^j = R_i^j + c\delta t_i + T_i^j - I_i^j + c\delta t^j + \lambda_{L_k} N_{L_k}^j + \epsilon_\phi^j. (4)$$

В (3) и (4), индекс i используется для обозначения пользователя, а верхний индекс j обозначает индекс ГНСС-спутников. Общим для псевдодалности и несущей фазы является наличие нескольких источников ошибок, где t_i является неизвестной смещения тактового сигнала ГНСС приемника в секундах, t_j является смещение тактового сигнала ГНСС передатчика в секундах, c - скорость света в вакууме в единицах метров в секунду, T_i^j задержка ГНСС сигнала из-за рефракции в нейтральной атмосфере в единицах метров, а I_i^j задержка фазы подъема / псевдодалности, вызванное сигналом рефракции при переходе через ионосферу Земли (обратите внимание на изменение знака между (3) и (4)) в единицах метров. Остальные неизвестные источники ошибок обозначаются ε и измеряются в единицах метров. В рамках модели фазы несущей (4), существует также неизвестное целое число фаз, называемое неоднозначностью, которая обозначается $N_{L_k}^j$ и получается из количества циклов фазы несущей посредством умножения на длину волны несущей в ГНСС λ_{L_k} , где $k = 1, 2$ и $L_1 = 19,0$ см и $L_2 \approx 24,4$ см для случая GPS. Кроме того, в формуле (3) и (4), геометрическое расстояние между фазовым центром антенны пользовательского приемника и фазового центра передающей спутниковой антенны обозначается, как R_i^j и задается:

$$R_i^j = \sqrt{(x^j - x_i)^2 + (y^j - y_i)^2 + (z^j - z_i)^2}. \quad (5)$$

где координаты пользователя и координаты спутника моделируются, как правило, в одинаковой декартовой системе координат при условии геоцентрической фиксированной Земли либо в геоцентрической инерциальной системе отсчета. Для метода PPP точные решения для поправок часов каждого передатчика ГНСС, t^j и орбитальных координат (x^j, y^j, z^j) определяются с использованием глобальной сети опорных станций слежения и используются вместо бортовых эфемерид ГНСС. Тем не менее, как правило, орбитальные положения спутников определяются относительно

центра тяжести каждого космического аппарата ГНСС. Таким образом, чтобы удовлетворять (5), пространственное положение каждого спутника должно быть смоделировано таким образом, чтобы смещение между фазовым центром антенны каждого спутника и его центром тяжести учитывалось должным образом. Для этого необходимо включить этот параметр в стратегию обработки спутниковых данных.

Мы будем рассматривать данные ГНСС, полученные двухчастотным приемником. Мы используем дисперсионную природу ионосферной задержки и формируем линейную комбинацию из двухчастотных сигналов для того, чтобы устранить влияние ионосферной рефракции сигнала первого порядка. Эта линейная комбинация называется ионосферо-свободной комбинацией и задается формулами (6) и (7) для псевдодальности и наблюдений фазы несущей, соответственно:

$$\rho_{IF}^j = \rho_{L1}^j \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right] - \rho_{L2}^j \left[\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right] \quad (6)$$

$$\phi_{IF}^j = \phi_{L1}^j \left[\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \right] - \phi_{L2}^j \left[\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right] \quad (7)$$

Заметим, что сумма коэффициентов в (6) и (7) (т.е. 2.546 и -1.546 для GPS) равна 1,0 и, таким образом, смоделированные источники ошибок общего типа, в том числе поправки часы и тропосферные задержки, остаются неизменными в наблюдениях IF. Тем не менее, при использовании IF комбинации, немоделируемые случайные ошибки, обозначаемые ϵ , увеличиваются.

Для ГНСС немоделируемыми источниками ошибок являются тепловой шум, шум входной схемы приемника и многолучевость. Наблюдаемая ϵ_r для псевдодальности составляет порядка 1 метра, а для фазы несущей ϵ_ϕ составляет порядка 1 миллиметра. Таким образом, при использовании IF комбинации измерительный шум составляет около 3 метров для псевдодальности и 3 миллиметров для фазы несущей (то есть $3 \approx \sqrt{2,5462 + 1,5462}$).

В (3) и (4), тропосферная задержка T_i^j обычно моделируется путем масштабирования направления зенитной задержки с использованием величины угла от которого зависит преобразование функции, чтобы уменьшить число параметров модели.

$$T_i^j = T_z Dry M^{Dry}(el_i^j) + T_z Wet M^{Wet}(el_i^j), \quad (8)$$

где el_i^j угол возвышения от исходного местоположения пользователя до спутника j . В рамках этого исследования, различные функции преобразования, M^{Dry} , M^{Wet} , используются в зависимости от стратегии решения и используемого программного обеспечения, как это будет подробно описано в следующем разделе.

Остальные смоделированные источники ошибок являются неоднозначностью фазы несущей. Традиционно, с кинематическим методом PPP, несмотря на то, что они, как известно, могут быть целым числом, они моделируются с плавающей запятой в параметрах фильтра PPP. Тем не менее, методы неоднозначности PPP были разработаны, и это остается активной областью исследований. Важным источником немоделируемой ошибки в терминах ϵ присутствующей в формуле (3) и (4), которые являются ошибками, обусловленными многолучевым распространением отражений. Эти ошибки относятся к отражению сигналов ГНСС, присутствующие в принятом сигнале наряду с линией рассматриваемого сигнала. К сожалению, многолучевое распространение приводит к ошибкам, которые по природе являются негауссовы и не бело-шумовые, поэтому такие алгоритмы оценки как фильтр Калмана или метод наименьших квадратов не подходят для их устранения. Вместо того, чтобы полностью не использовать метод обработки квадратов, может использовать метод, например, который описан в Juang. Тем не менее, многолучевое распространение индуцированных ошибок для фазы несущей на несколько порядков меньше, чем для псевдодалности. Кроме того, для многих бортовых приложений, многолучевые индуцированные ошибки, из-за отражения сигнала от искусственных

объектов, имеют меньший потенциал проблемы. В этом исследовании, для уменьшения многолучевого распространения индуцированных ошибок, наши оценки PPP будут в значительной степени зависеть от фазы несущей относительно данных для псевдодальности данных.

2.3. Кинематическая система прецизионного точечного позиционирования.

Первый подход PPP рассматриваемый в данном исследовании используется CaltechJPL's GNSS Inferred Positioning System и Orbit Analysis Simulation Software 6.2. GIPSY является основой геодезического и позиционированного программного обеспечения для НАСА TOPEX/Poseidon и Джейсоном, и GRACE околоземной орбиты космических аппаратов и оперативно используется для создания точных орбит GPS JPL, и часы продуктов для IGS.

При использовании Gipsy для кинематических PPP, наша стратегия в этом исследовании итерирует обработанные решения о местоположении при изменении параметров конфигурации Gipsy для того, чтобы сойтись к оптимальному решению, которые свободны от выпадающих данных. Блок-схема стратегии обработки показана на рисунке 10, которая требует определения некоторых терминов Gipsy:

(I) GNSS данные для определения местоположения. Это основной пользовательский интерфейс скрипт Gipsy для PPP.

(II) Псевдодальность данных для определения местоположения. Это скрипт Gipsy для псевдодальности только точки позиционирования.

(III) Временной зависимый параметр. Это выходной формат Gipsy для решений позиционирования и других решаемых параметров (например, часы уклонов, тропосферы и фазовых уклонов).

(IV) QM файл. Это исходный формат бинарного измерения в GNSS Gipsy.

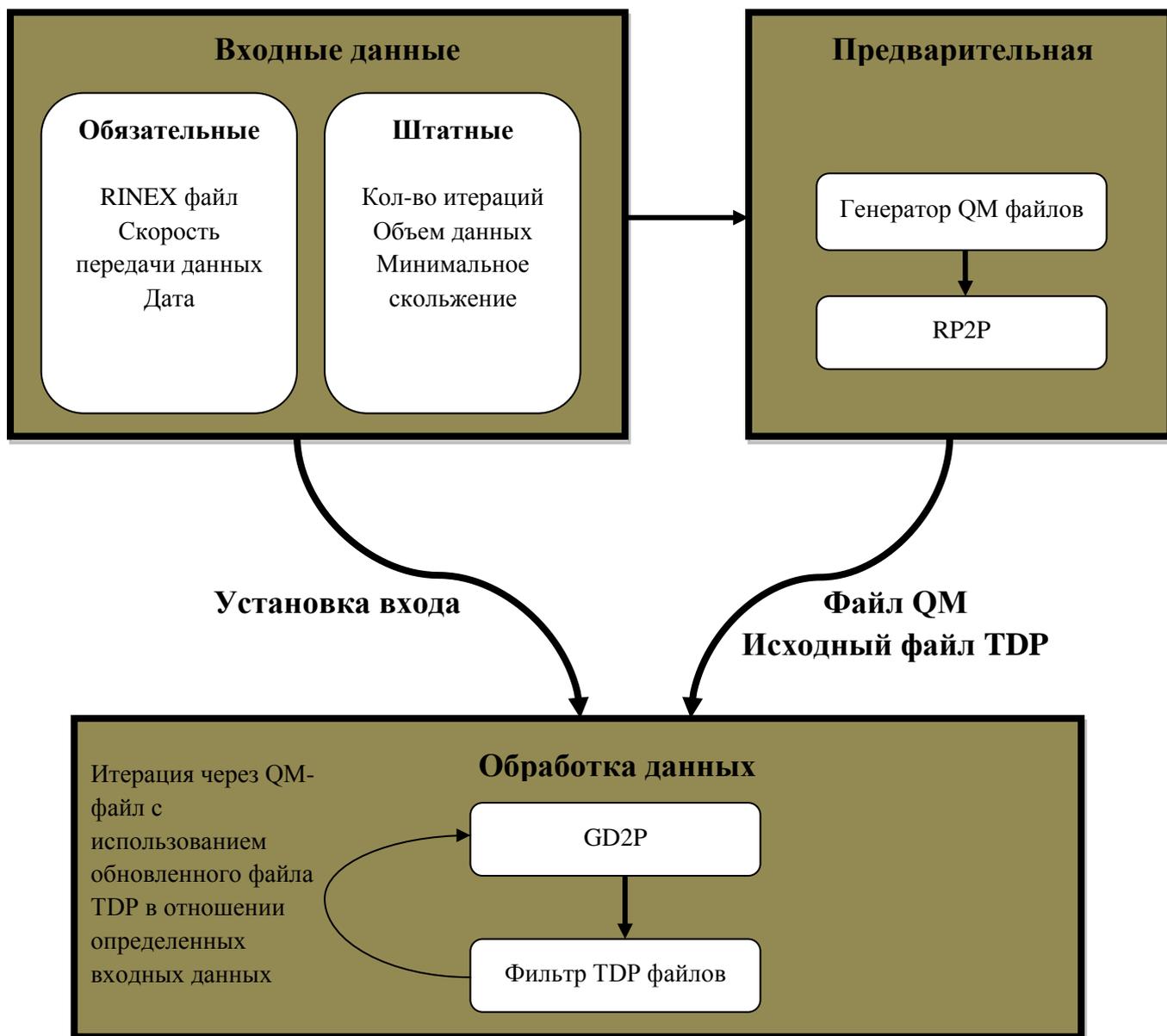


Рисунок10 - Кинематическая стратегия PPP с GIPSY-OASIS.

Как показано на рисунке 10, для первой итерации, решение позиции оценивается с использованием только измерения псевдодальности с PR2PGipsy. Кроме того, данные переводятся из формата ReceiverIndependentExchangeFormat в бинарный файл GipsyQM. В ходе этого процесса, редактор данных ГНСС используется для пометки разрыва фазы несущей и удаления больших выпадающих данных.

Для остальных итераций, подмножества GIPSY, параметры обработки изменяются во время принятия предыдущего решения о местоположении (TDP-файл) в качестве априорного решения о местоположении. На рисунке

10, параметры конфигурации изменяются в течение каждого опыта следующим образом:

1) Массы данных. Это измерения между коэффициентом шума псевдодальностью и измерениями фазы несущей. При этом запусится как один-к-одному и варьируется как сто к одному, где фазовые данные моделируются в 100 раз точнее, чем данные псевдодальности.

2) Дополнительное окно невязок. Внутри каждого GIPSY период обработки несколько раз проходит фильтр Калмана. Между каждым проходом, остатки дополнительных данных оцениваются, и эти данные помечаются как остатки на основе определенных порогов и исключаются из следующего прохода. При каждом шаге вычисляются невязки всех данных, таких как выступы и выбросы, и либо добавляются обратно в систему, либо исключаются из прохода. Этот процесс повторяется, пока все данные не будут соответствовать критериям дополнительного окна или не превысят максимальное число итераций.

3) Минимальное скольжение. После каждой итерации фильтра, скачки в дополнительных фазовых невязках используются для идентификации возможности разрыва фазы несущей, которые были пропущены редактором данных. Новые разрывы помечаются для следующей итерации.

2.4. Применение систем позиционирования с использованием буев.

Наиболее часто используемый способ получения абсолютной информации о положении под водой - посредством использования буев. Эти буи находятся в известных местах и АНПА получает дальность и / или азимут к нескольким из них, а затем вычисляет свою позицию через трилатерацию или триангуляцию.

В данный момент разрабатывается и тестируется система навигации и связи «Позиционер», разработанная Санкт-Петербургским концерном «Океанприбор».

В системе «Позиционер» предполагается использовать несколько типов буюв: подводные, плавающие и вмораживаемые в лед. Аппаратная часть буюа состоит из радио- и гидроакустических частей, с общей системой электропитания, помещенных в корпус из пластмассы. В то же время в состав радио- и гидроакустического оборудования входят ультракоротковолновая радиостанция, приемник ГЛОНАСС, комплект системы спутниковой связи «Гонец-Д1М» и аппаратура подводной связи с роботами.

В дрейфующем варианте аппаратная часть буюа помещается в защитный корпус с поплавками, в которых находятся дополнительные элементы питания. А вот вмораживаемый буюа комплектуется специальным высокопрочным термоконтейнером с высокой тепловой изоляцией.

Буюа имеют три режима работы. При первом изделие получает информацию по спутниковым каналам связи, запоминает и по требованию робота передает ее.

При втором режиме — «диалог» — буюа связывает по радиоканалу УКВ-диапазона в режиме реального времени береговые, воздушные, морские центры управления с подводными роботами. Такой обмен данными позволяет не только знать, где находится робот и какие задачи он решает, но и непрерывно управлять им.

Третий режим самый простой. Робот действует абсолютно-автономно и только сверяет свои координаты с буюами, корректируя курс. В экстренном случае, беспилотник может подать сигнал SOS, сообщив о прекращении глубоководной миссии.

Недостатком данной системы является то, что буюа могут располагаться в непосредственной близости от опорных станций, иначе они теряют сигнал и перестают получать и передавать информацию, что приводит к потере управления подводными аппаратами, а в дальнейшем может послужить причиной утери самого робота.

Выводы:

Применение систем PPP для определения местоположения АНПА будет зависеть от условий водных акваторий Баренцева моря.

Рассмотренная методология систем прецизионного точечного позиционирования показала, что для метода PPP точные решения поправок часов каждого передатчика ГНСС и орбитальных координат определяются с использованием глобальной сети опорных станций слежения и используются вместо бортовых эфемерид ГНСС.

Проблемами для систем PPP могут выступить не моделируемые источники ошибок, такие как тепловой шум, шум входной схемы приемника и многолучевость.

Рассмотренная кинематическая стратегия PPP с Gipsy показала что, данная стратегия итерировывает обработанные решения о местоположении при изменении параметров конфигурации Gipsy для того, чтобы сойтись к оптимальному решению, которые свободны от выпадающих данных.

Для получения информации о положении под водой предложено объединить систему PPP с системой навигации и связи «Позиционер», разработанной концерном «Океанприбор»

3 ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРЕЦИЗИОННОГО ТОЧЕЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТАХ

Коммуникация является очень важным требованием АНПА, особенно во время выполнения скоординированных миссий. Как и в случае навигации, для привязанных транспортных средств это может быть достигнуто с помощью волоконно-оптического канала. Однако такие случаи на практике ограничены.

Подводная среда представляет собой большую проблему для надежной связи с высокопропускной способностью. Для миссий, превышающих 100 км, внедрение точной навигационной системы сложнее, поскольку на большую дистанцию будет сильнее влиять INS. Развертывание сети маяков на такой большой площади нецелесообразно, и количество ориентиров, используемых геофизическими методами, на такой большой площади, требует более совершенных методов.

Подводная сеть может состоять из любого типа АНПА и других различных сенсорных узлов (либо выпущенных с поверхностных платформ, либо пришвартованных). Эти наземные платформы могут служить в качестве шлюзов и обеспечивать радиосвязь с береговыми станциями. Типичные акустические модемы, которые используются для создания подводных линий, работают с низкой скоростью передачи данных и колеблются до нескольких километров. При гораздо более коротких диапазонах от десятков до сотен метров, связь с более высокой производительностью может быть установлена с использованием высокочастотной акустики.

Традиционно, подводные лодки использовали акустические волны для подводной связи. Акустические волны в воде имеют большие расстояния распространения, это означает, что линии связи имеют большой радиус действия. Например, при несущей частоте 30 кГц волны ослабляются только на 0,3 дБ / м. С другой стороны, акустические коммуникации могут быть

нежелательными для некоторых подводных аппаратов по следующим причинам:

-Это требует больших модемов, что может быть проблемой для транспортных средств, предназначенных для перевозки только небольших полезных грузов.

-Кроме того, изменяющийся во времени многолучевой путь вызывает высокие частоты ошибок в бите, вызывает временные потери связи и делает невозможным декодирование передаваемого сигнала даже для отношений с высоким отношением сигнал / шум.

-Кроме того, большие (на пять порядков выше, чем у радиочастотных наземных каналов) и изменяющиеся во времени задержки вызовут еще одну проблему.

Экспериментальная установка

Для практического применения систем прецизионного точечного позиционирования, после сравнения нескольких программных обеспечений (таблица 1), предлагаем использовать программный комплекс NovAtelGrafNav/GrafNet для обработки статических и кинематических ГНСС (GPS+ГЛОНАСС) измерений.

GrafNav это программный пакет для истинной многобазовой постобработки статических и кинематических измерений, выполненных как в кодовом, так и фазовом режиме. В зависимости от методики сбора данных, качества измерений и применяемого режима обработки обеспечиваются точности от субсантиметров до субметров. Несмотря на то, что GrafNav прежде всего сориентирован на обработку траекторных измерений, пакет также выполняет многобазовую обработку одиночных статических сеансов наблюдений.

Это программа лучше всего подходит для работы с системами прецизионного точечного позиционирования, так как может одновременно обрабатывать измерения с нескольких одночастотных, двухчастотных приемников, а так же GPS+ГЛОНАСС измерения.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ NOVATEL ДЛЯ ПОСТОБРАБОТКИ

Возможности	GrafNav Static	GrafNav/GrafNet	Inertial Explorer
Плавающее статическое решение	×	×	×
Плавающее кинематическое решение		×	×
Фиксированное статическое решение	×	×	×
Фиксированное кинематическое решение (KAR)		×	×
Двухчастотное решение	×	×	×
Высокоточная обработка точки (PPP)	×	×	×
Двигающаяся базовая линия		×	
Нахождение азимута GPS		×	
Обработка данных IMU			×
Mission Planner	×	×	×
Конвертация данных GPS	×	×	×
Конвертация координат/datum	×	×	×
Скачивание сервисных данных	×	×	×

Таблица 1 - Сравнение программных обеспечений NovAtel

Так же для более точного позиционирования предлагаем оснастить как АНПА, так и буи двумя двухчастотными ГНСС-приемниками Novatel OEM-615 с антеннами рисунок 11.



Рисунок 11 - Двухчастотный ГНСС-приемник Novatel OEM-615

В качестве антенны, из прочитанной литературы и после сравнения нескольких вариантов, наилучшим выбором будет использование антенны NovAtel GPS-703GGG рисунок 12. Так как она является влаго и

вибростойкой, а также способна работать с сигналами всех действующих глобальных спутниковых навигационных систем на трех частотах.



Рисунок 12- Антенна NovAtelGPS-703 GGG

В этой настройке один приемник Novatel поддерживает GPS и GLONASS, а другой - только GPS. Необработанные двухчастотные псевдослучайные и несущие частоты ГНСС записываются со скоростью 10 Гц с использованием регистраторов данных MicroSD с открытым кодом OpenLog. Приемник GPS / ГЛОНАСС Novatel OEM-615 беспроводным образом подключается через модем 900 МГц к базовой станции, которая отправляет дифференциальные корректоры RTK. Дополнительно имеется механический вертикальный гироскоп, который непосредственно измеряет подачу и опрокидывание АНПА, а также вход пилота и четыре микроконтроллера IMIS для микроэлектромеханических систем ADIS-16405, которые подключаются через два микроконтроллера Netburner MOD-5213, записывающих данные в последовательные потоковые регистраторы данных OpenLog. Для постобработки записанные данные и потоки данных ГНСС, которые сопрягаются через микроконтроллер Netburner MOD-5213,

синхронизируются путем записи состояния импульсов в секунду от одного из приемников ГНСС. А другой двухчастотный приемник Novatel OEM-615 служит в качестве статического опорного приемника с антенной.

Выводы: Практические рекомендации по применению систем PPP включают в себя:

- Необходимость использования системы буферов для постоянной и непрерывной передачи информации.
- Подводную сеть, состоящую из любого типа АНПА и других различных сенсорных узлов.
- Использование акустических модемов, для создания подводных линий.

Для практического использования системы PPP рекомендуется использовать:

Программный комплекс NovAtel GrafNav/GrafNet;

Двухчастотный ГНСС-приемник Novatel OEM-615;

Антенна NovAtel GPS-703 GGG

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы выполнена - рассмотрено использование морских дронов в условиях арктических акваторий с применением систем прецизионного точечного позиционирования.

В процессе достижения цели получены следующие результаты.

1 Проведен анализ систем подводной навигации, применяемой в исследовательских и промышленных целях.

Системы подводной навигации АНПА используют три основных метода:

-мертвая учетная и инерциальная навигация – основанна использовании инерциального навигационного оборудования, погрешности измерений этого метода монотонно возрастают и неограничены, но для эффективного использования этих устройств АНПА должен быть достаточно медленным

-акустическая навигация - основана на использовании акустических сигналов транспондера для АНПА для определения его положения. Наиболее распространенными методами являются длинный базовый уровень и ультракороткая базовая линия. Оба метода имеют ограниченный диапазон и требуют установки маяков, что является довольно сложной и дорогостоящей операцией

-метод геофизической навигации - основан на получении оценки положения с помощью наблюдаемых физических характеристик. Этот метод обеспечивает лучшую точность по сравнению с другими технологиями, но он требует дорогостоящих полезных нагрузок с высоким потреблением мощности. Кроме того, они больше подходят для миссий, выполняемых в ранее исследованных районах.

Элементы системы подводной навигации включают в себя: глубинный сенсор, магнитный компас, GPS-датчики и расходомер.

Системы надводной навигации используют в основном две системы позиционирования: ГЛОНАСС и GPS

Позиционирование с помощью ГНСС может быть выполнено одним из трех способов: точечным (абсолютным) позиционированием, дифференциальным (относительным) позиционированием или прецизионно точечным позиционированием.

2 Исследованы вопросы применения систем прецизионного точечного позиционирования для определения местоположения АНПА, которая будет зависеть от условий водных акваторий Баренцева моря.

Рассмотренная методология систем прецизионного точечного позиционирования показала, что для метода PPP точные решения поправок часов каждого передатчика ГНСС и орбитальных координат определяются с использованием глобальной сети опорных станций слежения и используются вместо бортовых эфемерид ГНСС.

Проблемами для систем PPP могут выступить не моделируемые источники ошибок, такие как тепловой шум, шум входной схемы приемника и многолучевость.

Рассмотренная кинематическая стратегия PPP с Gipsy показала что, данная стратегия итерирует обработанные решения о местоположении при изменении параметров конфигурации Gipsy для того, чтобы сойтись к оптимальному решению, которые свободны от выпадающих данных.

Для получения информации о положении под водой предложено объединить систему PPP с системой навигации и связи «Позиционер», разработанной концерном «Океанприбор».

3 Разработаны практические рекомендации по применению навигационных систем PPP в АНПА, которые включают в себя:

- Необходимость использования системы буев для постоянной и непрерывной передачи информации.
- Подводную сеть, состоящую из любого типа АНПА и других различных сенсорных узлов.
- Использование акустических модемов, для создания подводных линий.

Для практического использования системы PPP рекомендуется использовать:

Программный комплекс NovAtelGrafNav/GrafNet;

Двухчастотный ГНСС-приемник Novatel OEM-615;

Антенна NovAtelGPS-703 GGG

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Cai C. Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GPS and GLONASS Measurements, M.Sc. Thesis, Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, UCGE Report 20291, 2009.
2. Cheng, W.H. A Study of Increasing the Precision of Navigation Position for Submerged Body // IEEE Journal of Oceanic Engineering—2004 – Vol.31. -pp.693–707.
3. Chitre M. Shahabudeen S., Stojanovic M. Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges // Marine technology society journal.— 2008. – Vol. 42, № 1. – P. 103-116.
4. Geng J., F. N. Teferle, X. Meng and A. H. Dodson. —Kinematic precise point positioning at remote marine platforms, GPS Solutions, September 2010, Volume 14, Issue 4 – pp. 343-350.
5. Heroux, P. and J. Kouba. GPS Precise Point Positioning with a Difference. Presented at: Geomatics '95, 13-15 June, Ottawa, Canada, 1995, p.11.
6. Heroux, P. and Kouba, J. (2001). GPS Precise Point Positioning Using IGS Orbit Products. Physics and Chemistry of the Earth (A), Vol. 26, No. 6-8, pp. 573-578.
7. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications // Underwater Vehicles / edited by Alexander V. Inzartsev. Vienna:In-Tech Publishers, 2009. P. 215–234.
8. Jakuba, M.V.; Roman, C.N.; Singh, H.; Murphy, C.; Kunz, C.; Willis, C.; Sato, T.; Sohn, R.A. Long-Baseline Acoustic Navigation for Under-Ice Autonomous Underwater Vehicle Operations // Journal Field Robot—2008 – Vol.25. -pp.861–879.
9. Kinsey J.C., Eustice R.M. and Whitcomb L.L. A survey of underwater vehicle navigation. In IFAC Conference of Manoeuvring and Control of Marine Craft, 2006.

10. Kussat N. H., Chadwell C. D., Zimmerman R., Absolute positioning of an autonomous underwater vehicle using GPS and acoustic measurements, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, - 2005.-Vol.30- pp.153-164.
11. Lachapelle G., Cannon M.E., Qiu W. and Varner C. Precise aircraft single-point positioning using GPS post-mission orbits and satellite clock corrections. *Journal of Geodesy*, Vol.70, 1996, pp.562-571.
12. Miller, P.A.; Farrell, J.A.; Zhao, Y.; Djapic, V. Autonomous Underwater Vehicle Navigation //*IEEE Journal of Oceanic Engineering*–2010 – Vol.35. -pp.663–678.
13. Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces. Interface specification IS-GPS-200. Revision D. 7 March 2006.
14. Tian, T. *Underwater Positioning and Navigation Technology*; National Defense Industry Press: Beijing,China. - 2007.
15. Tolman B., Harris R. B., Gaussiran T., Munton D., Little J., Mach R., Nelsen S., Renfro B., ARL:UT; Schlossberg D., University of California Berkeley. *The GPS Toolkit - Open Source GPS Software*. Proceedings of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2004). Long Beach, California. September 2004.
16. Zumberge, J.F., M.B. Heflin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins and F.H. Webb. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, Vol.102, No.B3, March 10, 1997, pp.5005-5017.
17. Yuh J., *Design and control of autonomous underwater robots: A Survey*, *Autonomous Robots*, Vol.8, 2000, pp.7-24.
18. Абрамов В.М., Попов Н.Н., Саноцкая Н.А., Шнеерсон Е.З., Соловаров Р., Кочешков Н.В., Кумпан С.А., Сальцберг Э.В., Попова А.Н., Трунин С.В. Разработка и создание малобюджетных исследовательских подводных дронов.//*Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право/ Вып. 2 (18) / Под ред. д.т.н., проф. Истомина Е.П. – СПб.: ООО «Андреевский издательский дом» - 2016 г. – С.60-69*

19. Агеев М.Д. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общей ред. М.Д. Агеева. – М.: Наука, 2005. – 400 с.
20. Брагинцев В.Ф., Сухой Ю.Г., Бурдин И.А., Мещеряков В.М. Первые результаты эксплуатации системы высокоточного определения эфемеридно-временной информации в реальном времени для гражданских потребителей и перспективы ее дальнейшего развития // Седьмая всероссийская конференция «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечения» (КВНО-2017), 17-21 апреля 2017 г., Санкт-Петербург: тезисы докладов – Спб.: ИПА РАН, 2017.
21. Ваулин Ю. В., Костенко А. В., Павин А. М. Навигационное и алгоритмическое обеспечение ТНПА для эффективного решения задач идентификации донных целей и инспекции морских объектов // Материалы науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток: 2013.
22. Ваулин Ю. В., Костенко А. В., Павин А. М. Особенности навигационного и алгоритмического обеспечения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата. // Подводные исследования и робототехника. - 2013 - № 2(16). – С. 4-16.
23. Вельтищев В.В., Егоров С.А., Кропотов А.Н., Кулешов В.И., Гурьев А.В. Особенности разработки навигационного обеспечения группировки АНПА // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 41-45.
24. Глобальная навигационная спутниковая система. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ (редакция 5.1). – М.: КНИЦ, 2008. http://glonass-center.ru/public_w.html
25. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования. Издание четвертое, переработанное и дополненное. Под ред. А.И. Перова и В.Н. Харисова. «Радиотехника», Москва, 2010. 3. Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации. — М.: Эко-Трендз, 2000. — 270 с.

26. Дворкин В. В., Карутин С. Н., Глухов П. Б. Анализ состояния и перспектив развития технологии высокоточного местоопределения по сигналам ГНСС. //Радиотехника, Радиотехника, Москва, 2011. – № 3 – С. 4-13.
27. Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Рылов Н.И. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2. – С. 5-14.
28. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В., Ваулин Ю.В. Навигация и управление в подводном пространстве // Мехатроника, автоматизация, управление. –2004. – № 5.– С. 23-28.
29. Песков Ю.А Морская навигация с ГЛОНАС/GPS/ Учебное пособие для вузов + CD. М.: Морская книга, 2010. С -3.
30. Поваляев А. А.. Спутниковые радионавигационные системы. Время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат. «Радиотехника», Москва, 2008. – 328 с.
31. Подкорытов А. Н. Высокоточное определение координат потребителя в глобальных навигационных спутниковых системах с использованием уточненной эфемеридно-временной информации. Вестник Московского авиационного института. №3, т.18, 2011г, МАИ. - стр.233-239.
32. Сальцберг Э.В., Кумпан С.А. Исследование возможности применения систем прецизионного точечного позиционирования в навигации морских дронов. //Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право/ Вып. 1 (19) / Под ред. д.т.н., проф. Истомина Е.П. - СПб.: ООО «Андреевский издательский дом» - 2017 г. - С.27
33. Федеральная целевая программа «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012 - 2020 годы» URL: <http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-9/V/Glonass.pdf> (дата обращения 14.05.2017).