МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА
Механико-математический факультет

На правах рукописи

УДК 531.01

Филатова Гузель Амировна

НАВИГАЦИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ПОМОЩИ БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Специальность 01.02.01 теоретическая механика

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научные руководители:
к.ф.-м.н. Вавилова Н.Б.
д.ф.-м.н., проф. Парусников Н.А.

Москва 2017

Содержание

Введение **4**

1 Структура и функционирование навигационного комплекса автономного подводного аппарата **20**

1.1 Основные принципы устройства навигационного комплекса 20

1.2 Выбор типа автономного подводного аппарата для исследований 23

2 Математические модели задачи коррекции БИНС АПА 27

2.1 Постановка задачи коррекции БИНС 27

2.2 Модельные уравнения БИНС 31

2.3 Уравнения ошибок БИНС 37

2.4 Модель инструментальных погрешностей БИНС 40

2.5 Уравнения корректирующих измерений 41

2.6 Вектор состояния уравнения ошибок БИНС 46

2.7 Модели корректирующих поправок к выходной информации 47

2.8 Алгоритм коррекции 48

2.9 Выводы 51

3 Анализ точности построенного алгоритма навигации АПА **52**

3.1 Ковариационный анализ задачи коррекции БИНС АПА . . 53

3.2 Моделирование алгоритма навигации подводного робота с привлечением реальных данных 62
3.3 Выводы 68

4 Метод повышения точности навигационной системы подводного аппарата путем специального режима движения перед погружением 69
4.1 Анализ возможностей калибровки навигационной системы на поворотном устройстве 70
4.2 Калибровочный режим движения АПА перед погружением 74
4.3 Постановка задачи 74
4.4 Результаты ковариационного анализа 76
4.5 Выводы 80

5 Оценивание погрешности масштабного коэффициента гидроакустической навигационной системы 81
5.1 Постановка задачи 82
5.2 Результаты ковариационного анализа 82
5.3 Выводы 84

Заключение 86

Литература 87

Введение

Диссертационная работа посвящена решению задачи навигации автономного подводного аппарата при помощи бескарданной инерциальной навигационной системы.

Актуальность темы

Исследованию и освоению Мирового океана уже давно уделяется большое внимание. Одним из основных средств исследований на сегодняшний день являются автономные подводные аппараты (АПА). Малая инерционность, быстрая подготовка к работе, автономность, возможность установки на борт различного оборудования и многое другое позволяет применять АПА для широкого круга научных и прикладных задач. Они демонстрируют высокую эффективность при выполнении достаточно сложных глубоководных обзорно-поисковых работ, дают возможность проводить морскую геологическую разведку, позволяют изучать подводную обстановку и осуществлять экологический мониторинг водной среды.

Наибольшее практическое значение в развитии и использовании автономных подводных аппаратов имеют обзорно-поисковые работы. Они включают в себя съемку дна по площади, поиск и обследование зато-

нувших объектов и искусственных сооружений, геологоразведку и картографирование дна.

Распространено использование АПА для обследования протяженных объектов, таких как подводные кабели, трубопроводы и водоводы. Аппарат может определить подвижки трубопровода, обнаружить и измерить провисы и обнажения, оценить состояние антикоррозионной защиты, найти утечки и так далее.

Экологический мониторинг водных акваторий при помощи подводных аппаратов включает в себя измерение гидробиологических, гидрохимических и гидрофизических параметров среды с последующим картографированием данных.

Рисунок 1: Глубоководный обзорно-поисковый робото-технический комплекс «Лортодромия»

Все перечисленные задачи, решаемые при помощи АПА, так или иначе могут быть использованы и в военных целях. Но при этом АПА должен иметь большой радиус действия (около 1000 км), предварительные

работы перед запуском миссии должны занимать минимальное количество времени, а также требуется высокая точность навигационных данных. На рисунках 1, 2 представлены образцы АПА различного назначения.

Рисунок 2: Автономный подводный аппарат МТ-2010

Для решения перечисленных задач АПА может быть оборудован различными наборами датчиков, но при этом учитываются ограничения, которые диктуются автономностью и небольшими габаритами аппарата. Таким образом, системы, входящие в состав многоцелевых автономных подводных аппаратов и судового оборудования, отличаются большим разнообразием по назначению и физическим принципам работы.

АПА может погружаться в определенный район океана на заданную глубину, двигаться по программной траектории, выполнять требуемые работы и по окончанию программы возвращаться в назначенную позицию.

Одними из преимуществ автономных подводных аппаратов по сравнению с привязными (телеуправляемыми и буксируемыми) аппаратами является то, что они не требуют обязательного использования сопровождающего судна и могут обслуживаться с берега, двигаются по любой наперед заданной траектории и выполняют необходимые измерения с высокой точностью и детальностью.

Ключевым фактором эффективности АПА является точность его навигационной системы. От нее зависит и успешность выполняемой миссии, и ценность исследовательских данных.

Для большинства задач с использованием АПА ошибка определения его местоположения не должна превышать 10 метров, а для миссий военного назначения может потребоваться точность порядка одного метра.

Из вышесказанного следует актуальность темы диссертации.

Научная новизна

Традиционно навигация АПА обеспечивается средствами бортовой навигационной системы счисления пути (ССП) и гидроакустической навигационной системы (ГАНС). Формирование текущей оценки координат достигается за счет комплексирования информации бортового и наводного комплекса и активного информационного обмена навигационными данными. При работе АПА накапливающаяся ошибка местоположения уменьшается за счет коррекции данных бортовой системы навигации данными ГАНС.

Навигационная система АПА включает в себя гидроакустический датчик дальности до наводного маяка с известными координатами, лаг,

глубиномер, блок чувствительных элементов — датчиков угловой скорости (ДУС) и ньютонометров.

Нетривиальность навигационной задачи состоит в том, что ни одно из перечисленных средств само по себе не позволяет определить местоположение АПА в пространстве под водой. Забегая вперед, скажем, что АПА оснащаются также приемниками спутниковой навигационной системы (СНС), которые могут функционировать только в надводном положении и облегчают поиск АПА после всплытия. А под водой только комплексная обработка всей доступной информации дает возможность построить навигационное решение.

Принципиальной особенностью данной работы является то, что обработка информации осуществляется так, как это делается в корректируемых бескарданных инерциальных навигационных системах. А именно, датчики инерциальной информации используются не только для определения ориентации, но и как средство определения фазовых координат. При этом, информация БИНС рассматривается как основная, а информация о дальности до специального гидроакустического маяка, скоростной информации от лага и информации о глубине погружения, доставляемой глубиномером, используется как корректирующая. Предполагается, что используются датчики инерциальной информации среднего класса точности в силу ограничений по размеру, энергопотреблении и стоимости. В качестве алгоритма оценивания погрешностей БИНС и инструментальных погрешностей средств дополнительной информации используется калмановская фильтрация. Математические модели построены с учетом специфики условий работы аппарата (малые скорости движения, сравнительно малые удаления аппарата от маяка).

Практическое применение работы

Разработанные методы и алгоритм могут быть применены для решения задачи навигации АПА с высокой точностью как в реальном времени, так и в постобработке. Так как в составе бортовой навигационной системы большинства современных АПА содержится измерительный инерциальный блок, доставляющий информацию об удельной силе и угловой скорости, для реализации алгоритма не потребуется установки дополнительных датчиков.

В России основным местом разработки подводных аппаратов является Институт проблем морских технологий им. М.Д. Агеева дальневосточного отделения РАН, с которым налажены контакты лабораторией управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова. Институт является мировым лидером в разработке и практическом использовании АПА. За последние десятилетия подводные аппараты института принимали активное участие в проведении многих известных морских операций по поиску и обследованию затонувших объектов в различных районах Мирового океана. Лаборатория управления и навигацией МГУ им. М.В. Ломоносова осуществляет сотрудничество с Институтом в форме обсуждения результатов и обмена информацией.

Обзор литературы

В последние годы благодаря развитию в области технологии производства навигационных датчиков, а также средств сбора и регистрации информации, инерциальные навигационные системы используются для широкого круга прикладных задач, таких как навигация дефектоскопа

в газовых и нефтяных трубах [1], задачи топопривязки [2], [3] и авиационной гравиметрии [4], [5].

В лаборатории навигации и управления механико-математического факультета МГУ им. М.В Ломоносова накоплен большой опыт по решению фундаментальных и прикладных задач с использованием инерциальных систем. Публикации, выпущенные при участии коллектива лаборатории, охватывают широкий круг тем навигационной теории ([6], [7]. [8], [9], [10], [11], [4], [5], [12] и многое другое).

Теория инерциальный навигации подробно описана в работах Ишлинского А.Ю. [13], Андреева В.Д. ([14], [15], [16]), Н.А. Парусникова ([17], [18], [6], [7]), А.А. Голована ([19], [20]), К.К. Веремеенко [21], П. Сэведжа [22], М.С. Гревала ([23], [24]) и др.

Наряду с развитием теории автономных инерциальных систем активно развивалась теория корректируемых инерциальных навигационных систем, в которых для повышения точности навигационных данных привлекается дополнительная информация неинерциальной природы ([7], [25]). Особенно актуальны работы по коррекции БИНС при помощи данных от приемников спутниковой навигационной системы ([26], [27], [28]).

Методом решения задачи коррекции БИНС является ее линеаризация и последующая калмановсквая фильтрация ([29], [30], [24]).

При постановке задачи оценивания вектора состояния линейной динамической системы при помощи доставляемой измерителями информации, необходимо понимать насколько хорошо оцениваются компоненты вектора состояния. Для этого вводятся соответствующие характеристики. Решение задач с введением и применением мер оцениваемости пред-

ставлены, например, в публикациях Н.А. Парусникова и А.А. Голована ([7], [19], [31]).

Первые работы по навигации АПА связаны с именем основателя Института морских технологий Михаила Дмитриевича Агеева [32]. Традиционно навигация АПА обеспечивается средствами бортовой навигационной системы счисления пути (ССП) и гидроакустической навигационной системы (ГАНС) [32]. Положение АПА определяется при помощи интегрирования компонент вектора скорости, доставляемые датчиком относительной или абсолютной скорости. Для определения курса может использоваться магнитный компас. Формирование текущей оценки координат достигается за счет комплексирования информации бортового и наводного комплекса и активного информационного обмена навигационными данными. При работе АПА накапливающаяся ошибка местоположения уменьшается за счет коррекции данных бортовой системы навигации данными ГАНС.

Подробный обзор отечественных и зарубежных разработок ГАНС приведен в работах [33], [34], [35]. Существует два типа систем — основанные на измерении расстояния от опорных точек до объекта навигации (длинная или короткая база, ГАНС-ДБ) и системы, использующие дальномерные и угломерные данные до малогабаритной приемной антенны (ультракороткая база, ГАНС-УКБ). В настоящее время ГАНС-ДБ представляют собой надежное навигационное средство, но являются дорогими в обслуживании, требуют время на подготовку к запуску и накладывают ограничения на район исследований [36]. В предварительные работы по подготовке ГАНС-ДБ входит: установка маяков на дно обследуемой территории, калибровка сети маяков и их подъем после окончания

миссии. Описанные работы могут длиться в течение нескольких суток. Системы ГАНС-УКБ широко распространены благодаря своей простоте и удобству использования [37], но не могут обеспечить требуемые точности при дистанциях между подводным аппаратом и приемной антенной более 1 км.

Одним из главных направлений в разработке подводных аппаратов сегодня является повышение мобильности и экономической эффективности. Последние модели подводных аппаратов используют для навигации гидроакустические маяки, которые могут двигаться по поверхности моря и определять свои координаты при помощи приемников СНС ([38], [39]).

В существующих системах, используемых при навигации АПА, важным параметром является точность измерения дальности, которая определяется точностью задания эффективной скорости звука [40]. Для повышения точности определения дальностей предусматриваются предварительные работы по определению значения эффективной скорости звука.

Структура работы

В первой главе описывается организация исследуемого навигационного комплекса: гидроакустическая и бортовая навигационные системы АПА, гидроакустическая система связи, а также объясняется их работа в штатном режиме.

Во второй главе ставится задача коррекции БИНС с учетом особенностей режимов работы АПА и состава его аппаратуры. Вводятся используемые системы координат, модельные уравнения, уравнения ошибок БИНС. Выбирается модель инструментальных погрешностей. Выводят-

ся соотношения, описывающие корректирующие измерения, в которых используется информация о скорости, глубине погружения, дальности до маяка с известными координатами. Описывается задача коррекции БИНС в варианте введения обратных связей.

Третья глава посвящена ковариационному анализу точности алгоритма коррекции БИНС АПА при условиях, приближенных к реальным: принятые характеристики погрешностей всех датчиков задаются в рамках существующих на данный момент, а также используются типовые траектории АПА и АВА. Для проверки работоспособности построенного алгоритма навигации АПА проводится его моделирование в реализациях с использованием комбинации реальных данных и имитационных моделей движения. Описывается схема моделирования, использованные данные и результаты моделирования.

Четвертая глава посвящена разработке метода подготовки навигационной системы перед погружением, цель которой — повышение точности навигации на начальных этапах движения. Рассматривается возможность калибровки БИНС на поворотном устройстве и приводятся результаты применения такого подхода. Предлагается калибровочный режим навигационной системы АПА, в котором используется информация от приемников СНС, установленных на подводном аппарате. Приемники можно использовать при движении АПА по поверхности воды. Описывается математическая постановка задачи и результаты ковариационного анализа, демонстрирующие эффективность предложенного метода.

В пятой главе описывается способ оценки погрешности гидроакустической навигационной системы, связанной с точностью определения эф-

фективной скорости звука в воде, для определения которой обычно проводятся предварительные работы.

Публикации по теме диссертации

По теме диссертации подготовлены следующие публикации:

1. *Субханкулова Г.А.* Навигация автономного необитаемого подводного аппарата с использованием бескарданной инерциальной навигационной системы. XXIV международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации», Сборник материалов, 2015, Алушта, Россия.

2. *Субханкулова Г.А., Парусников Н.А., Дубровин Ф.С.* Навигация автономного необитаемого подводного аппарата с использованием бескарданной инерциальной навигационной системы. XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Аннотации докладов, изд-во Академии наук РТ, Казань, Россия, 2015.

3. *Вавилова Н.Б., Субханкулова Г.А.* Анализ точности алгоритма навигации подводного аппарата с использованием бескарданной инерциальной навигационной системы. XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов, Санкт-Петербург, Россия, 2016.

   В том числе публикации в журналах из списка ВАК:

4. *Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Субханкулова Г.А.* Навигация автономного подводного аппарата при помощи корректируемой бескарданной инерциальной навигационной системы. «Труды МАИ», №88, Москва, 2016.

5. *Вавилова Н.Б., Парусников Н.А., Филатова Г.А.* Подготовка навигационной системы подводного аппарата перед его погружением. Электронный журнал «Труды МАИ», №93, Москва, МАИ, 2017.

По материалам диссертационной работы были сделаны следующие доклады:

1. *Субханкулова Г.А.* Навигации автономного необитаемого подводного аппарата с использованием бескарданной инерциальной навигационной системы. // XXIV международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации», 2015, Алушта, Россия.

2. *Субханкулова Г.А., Парусников Н.А., Дубровин Ф.С.* Навигация автономного необитаемого подводного аппарата с использованием бескарданной инерциальной навигационной системы. // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, 2015, Казань, Россия.

3. *Вавилова Н.Б., Субханкулова Г.А.* Анализ точности алгоритма навигации подводного аппарата с использованием бескарданной инерциальной навигационной системы. // XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2016, Санкт-Петербург, Россия.

Автор выражает огромную благодарность Вавиловой Нине Борисовне и Парусникову Николаю Алексеевичу за постановку задачи и научное руководство, Головану Андрею Андреевичу и всем сотрудникам лаборатории навигации и управления МГУ им. М.В. Ломоносова за ценные замечания, конструктивную критику и поддержку, НОЦ «Подводная робототехника» ИПМТ им. М.Д. Агеева за предоставленные данные и помощь в их использовании.

Список обозначений

В работе используются обозначения, принятые в лаборатории управления и навигации механико-математического факультета МГУ.

Система координат обозначается заглавной и строчными буквами, например, $O\xi$ ($O\xi_1\xi_2\xi_3$), где заглавная буква обозначает начало координат, а строчные буквы - наименования осей.

Векторы обозначаются строчными буквами с нижним индексом, обозначающим, в какой системе координат задан вектор. Например, запись a_ξ обозначает, что вектор a задан своими проекциями в осях системы координат $O\xi$.

Пусть $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ – вектор малого поворота. Символом $\hat{\beta}$ обозначается кососимметрическая матрица

$$\begin{pmatrix} 0 & \beta_3 & -\beta_2 \\ -\beta_3 & 0 & \beta_1 \\ \beta_2 & -\beta_1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Этот символ удобно использовать для записи векторного произведения

$$\bar{y} = \bar{\beta} \times \bar{x} = -\hat{\beta}x.$$

Матрица взаимной ориентации двух систем координат обозначается заглавной буквой с двумя нижними индексами, например, $A_{\xi\eta}$ - матрица взаимной ориентации систем координат $O\xi$ и $O\eta$, причем

$$a_\xi = A_{\xi\eta} a_\eta.$$

x^c – значение переменной x, полученное с помощью спутниковой информации.

x' – модельное значение переменной x.

M – точка приведенной чувствительной массы блока ньютонометров.

ψ – угол курса.

γ – угол крена.

ϑ – угол тангажа.

v – вектор абсолютной скорости объекта.

V – вектор скорости объекта относительно Земли.

Ω – вектор угловой скорости трехгранника относительно Земли.

ω – вектор абсолютной угловой скорости трехгранника.

u – вектор (и модуль) угловой скорости вращения Земли.

a – большая полуось земного эллипсоида.

g – модуль удельной силы тяжести.

φ, λ, h – широта, долгота, высота – географические координаты точки.

В работе используются устоявшиеся в данной области аббревиатуры, которые, к сожалению, могут приводить к трудностям понимания при первом чтении. Список приведен ниже.

ИНС – инерциальная навигационная система.

БИНС – бескарданная инерциальная навигационная система.

СНС – спутниковая навигационная система.

ДУС – датчик угловой скорости.

АПА – автономный подводный аппарат.

АВА – автономный водный аппарат.

ССП – система счисления пути.

ГАНС – гидроакустическая навигационная система.

ГАНС-ДБ – гидроакустическая навигационная система с длинной базой.

ГАНС-УКБ – гидроакустическая навигационная система с ультракорот-

кой базой.

ГАНС СДБ – гидроакустическая навигационная система с синтезированной длинной базой.

ГАСС – гидроакустическая система связи.

СКО – среднеквадратическое отклонение.

Глава 1

Структура и функционирование навигационного комплекса автономного подводного аппарата

В главе описывается организация исследуемого навигационного комплекса, его работа в штатном режиме.

1.1 Основные принципы устройства навигационного комплекса

Навигационный комплекс автономных подводных аппаратов состоит из гидроакустической и бортовой системы [32]. Гидроакустическая навигационная система может включать в себя систему с длинной базой (ГАНС-ДБ), систему с короткой базой (ГАНС-УКБ), гидроакустическую систему связи (ГАСС). Также в состав входят приемопередаующие устройства на самом аппарате, для ГАНС-УКБ используется плаваю-

щая гидроакустическая антенна с необходимым набором навигационных датчиков, для ГАНС-ДБ – комплект донных маяков с известными координатами.

Принцип работы ГАНС-ДБ основан на измерении дальностей до маяков-ответчиков с известными координатами. Передатчик на борту подводного аппарата излучает гидроакустический сигнал, приемник регистрирует ответный сигнал от маяка. Дальность определяется при помощи измерения времени распространения гидроакустического сигнала до маяка и обратно. Погрешность определения местоположения аппарата зависит от точности задания координат маяка, определения эффективной скорости звука и точности фиксации моментов прихода отклика от маяка. Применение ГАНС-ДБ оправдано в том случае, когда предполагаются многократные запуски АПА в одном и том же районе покрытия, так как система является дорогой в обслуживании, требует время на подготовку к запуску и накладывает ограничения на район исследований. В предварительные работы по подготовке ГАНС-ДБ входит: установка маяков на дно обследуемой территории, калибровка сети маяков и их подъем после окончания миссии. Описанные работы могут длиться в течение нескольких суток.

Системы с ультракороткой базой используют только один маяк, который излучает гидроакустические импульсы без предварительного опроса. Информация, доставляемая маяком и подводным аппаратом, должна быть синхронизирована. Измеряемой величиной является время распространения сигнала, а также разность фаз прихода сигналов на элементы приемной антенны, установленной на АПА. На основе обработ-

ки амплитудно-фазовой информации в каналах антенны определяются дальность, азимут и угол места нахождения подводного аппарата.

За обмен данными между подводным аппаратом и сопровождающим судном или береговым оборудованием отвечает гидроакустическая система связи (ГАСС). Она позволяет варьировать скорость передачи, объем и частоту обновления информации, необходимые для каждой миссии.

В состав бортовой системы навигации входят лаг, глубиномер, гироскопический датчик курса, а также приемник спутниковой навигационной системы, который может использоваться при всплытии и движении по поверхности воды.

На борту аппарата может использоваться как относительный лаг, измеряющий скорость относительно воды, так и абсолютный лаг, определяющий скорость относительно дна. Относительные лаги делятся на индукционные, принцип работы которых основан на свойстве электромагнитной индукции, и гидродинамические, определяющие скорость на основе информации о гидродинамическом давлении, создаваемом скоростным напором набегающего потока воды при движении объекта. Абсолютные лаги делятся на доплеровские и корреляционные. Доплеровский лаг использует информацию о доплеровском сдвиге частоты высокочастотного гидроакустического сигнала, отражённого от поверхности дна. Большая часть доплеровских лагов имеют ограничение в 200-300 м, при больших глубинах лаг переходит в режим измерения скорости относительно толщи воды. Корреляционные лаги измеряют временный сдвиг между идентичными акустическими сигналами на две антенны, которые разносятся по корпусу аппарата. На глубинах более 200 м такие лаги также переходят в измерение скорости относительно толщи воды.

Основными направлениями при разработке АПА сегодня является повышение их мобильности и экономической эффективности. С этим связана разработка новых видов ГАНС, одной из которых является ГАНС с синтезированной длинной базой (ГАНС СДБ) [41], [42]. Вместо использования маяков, которые необходимо устанавливать на дно и поднимать по окончанию работ, предполагается использовать единственный мобильный маяк, который может буксироваться сопровождающим судном или автономным водным аппаратом (АВА). В качестве ГАСС используется гидроакустический модем, позволяющий синхронно обмениваться навигационными данными между АПА и сопровождающим судном или мобильным маяком, а также измерять время распространения сигнала для определения расстояния между объектами. Подробно работа навигационной системы с использованием ГАНС СДБ описана в [43]. Далее будем опираться именно на эти новые разработки.

1.2 Выбор типа автономного подводного аппарата для исследований

Одной из последних разработок АПА с ГАНС СДБ в России является новый автономный подводный аппарат «МАРК» (морской автономный робототехнический комплекс), разработанный в 2011 году в научно-образовательном центре (НОЦ) «Подводная робототехника», образованном Дальневосточноым федеральным университетом и Институтом проблем морских технологий РАН [44]. Характеристики аппарата «МАРК» приведены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1: Технические характеристики АПА «МАРК»

Максимальная глубина погружения	200 м
Масса	50 кг
Длинна	1,8 м
Диаметр корпуса	0,23 м
Максимальная скорость	3 м/с

В качестве ГАНС СДБ используется мобильная гидроакустическая антенна, буксируемая при помощи АВА. Координаты антенны рассчитываются при помощи данных от СНС и передаются при помощи гидроакустического модема.

Бортовая навигационная система аппарата состоит из датчика глубины, доплеровского лага и инерциального измерительного устройства, при помощи которого измеряются углы курса, крена, дифферента, а также определяются угловые скорости.

На основе данных о скорости, глубине и угле курса происходит счисление пути, а накапливающаяся ошибка корректируется при помощи информации о дальности до мобильной антенны.

В диссертации предлагается использовать именно данные датчиков этого устройства в принципиально новой схеме.

Все моделирования в работе проводятся с использованием данных, полученных при морских испытаниях комплекса «МАРК» и предоставленных НОЦ «Подводная робототехника».

Предполагается, что на борту подводного аппарата организуется бескарданная навигационная система (БИНС) среднего класса точности.

Приборной основой БИНС служат установленные блоки из трех ньютонометров, трех датчиков угловой скорости (ДУС) и бортовой вычислитель.

Для реализации БИНС выбраны ньютонометры MEMS и волоконно-оптические ДУС, так как подводный аппарат имеет ограничение по габаритам, энергопотреблению и стоимости, а указанные датчики уже зарекомендовали себя при использовании в аналогичных задачах [1].

В качестве корректирующей информации для БИНС используется скоростная информация от доплеровского лага, инфомация о глубине погружения, а также дальность до мобильной антенны на АВА.

Состав навигационной системы подводного аппарата, включающего в состав БИНС представлена на Рисунке 1.1.

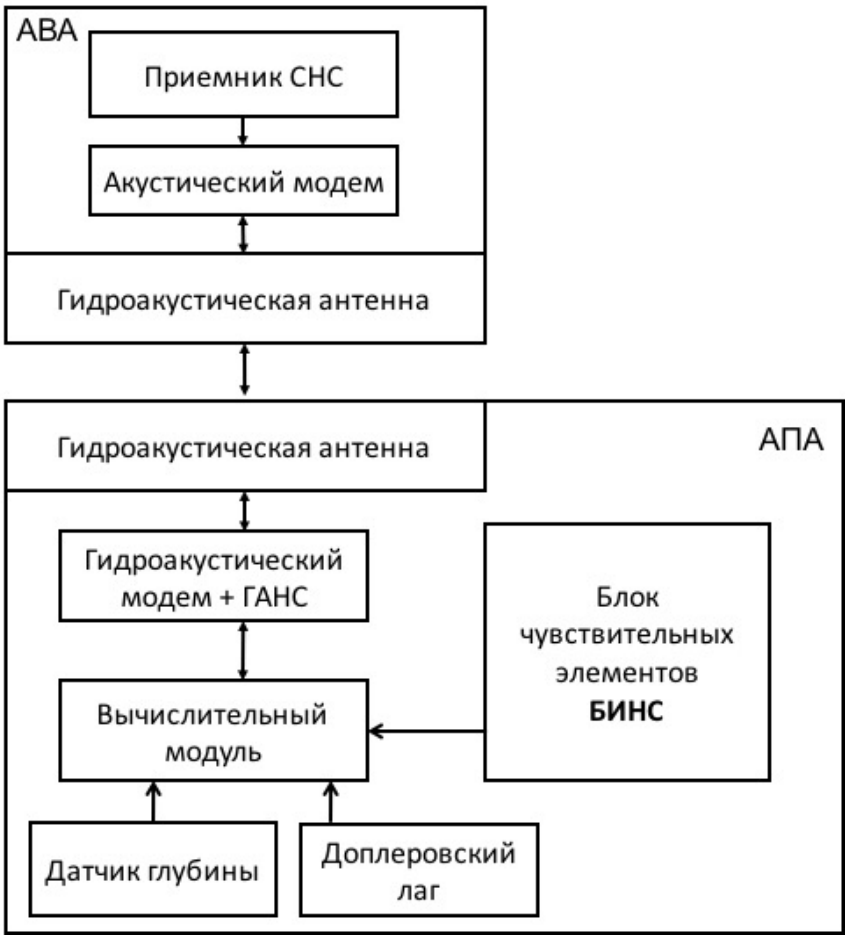

Рисунок 1.1: Состав навигационной системы АПА

Глава 2

Математические модели задачи коррекции БИНС АПА

2.1 Постановка задачи коррекции БИНС

Инерциальная навигационная система является моделью двух механических объектов: материальной точки M, движущейся в поле сил земного тяготения под действием внешней силы и приборного трехгранника, связанного с движущимся объектом.

Приведем постановку задачи коррекции БИНС в общем виде, как ее описывают в [25], [45]. Будем рассматривать систему — материальную точку M и трёхгранник Mx, поведение которого описывается уравнением:

$$\frac{dX}{dt} = F(X, U), \qquad X(t_0) = X_0, \tag{2.1}$$

где $X\ (n \times 1)$ — вектор состояния объекта; $U\ (m \times 1)$ — внешнее воздействие, доступное измерению; $F\ (n \times 1)$ — известная, дифференцируемая по своим аргументам функция.

Уравнение (2.1) таково, что величины X_0, $U[t_0, t]$ необходимы и достаточны для однозначного определения состояния $X(t)$.

Ставится задача непрерывного определения во времени вектора X (или некоторого вектора $S\,(l \times 1) : S = \Psi^s(X)$).

Для решения этой задачи используется система J, содержащая вычислительное устройство и измерители, доставляющие информацию о векторе U. В вычислительное устройство вводится информация о начальном состоянии объекта.

Уравнения, которыми описывается работа системы J будем называть модельными уравнениями, а переменные в этих уравнениях — модельными переменными, обозначаемые теми же буквам, но с акцентом штрих: $'$: X', U', S'.

Для определения текущего значения вектора состояния X привлекаются два вида информации, условно разделяемые на основную и дополнительную.

Основная информация

$$\begin{aligned} X_0^{'} &= X_0(t_0) + x_0, \\ U^{'} &= U(t) + u(t), \end{aligned} \tag{2.2}$$

где x_0 — ошибка начального значения вектора состояние, $u(t)$ — инструментальная погрешность измерения U.

Дополнительная информация Предполагается, что дополнительная информация описывается уравнением:

$$Z = \Theta(X, w). \tag{2.3}$$

Здесь Z — вектор дополнительной информации, w — вектор малой погрешности дополнительной информации, Θ — известная вектор-функция.

Далее будем считать x_0, r, u малыми величинами, чтобы решать задачу в линейной постановке.

Естественным способом определения вектора X' (S') с помощью системы J служит такой, при котором модельные уравнения системы J имеют вид:

$$\begin{aligned} &\frac{dX'}{dt} = F(X', U'), \\ &X'(t_0) = X'_0, \\ &S' = \Psi^s(X'). \end{aligned} \tag{2.4}$$

Введем ошибки определения соответствующих переменных:

$$\begin{aligned} &x = X' - X, \\ &u = U' - U, \\ &s = S' - S. \end{aligned} \tag{2.5}$$

Будем считать величины x, u, s малыми настолько, что возмущенную работу системы J можно было описать с помощью линейных уравнений ошибок:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= Ax + q, \quad q = Bu, \quad s = Cx, \\ A &= \frac{\partial F}{\partial X}, \quad B = \frac{\partial F}{\partial U}, \quad C = \frac{\partial \Psi^s}{\partial X}. \end{aligned} \tag{2.6}$$

Вследствие малости x, u, аргументами производных в (2.6) можно считать величины X', U'.

Введём величину $z = Z - \Theta(X')$, тогда с точностью до второго порядка малости:

$$\begin{aligned} z &= Hx + r, \\ H &= \frac{\partial \Theta(X)}{\partial X}. \end{aligned} \tag{2.7}$$

Таким образом, задача коррекции сводится к определению вектора x, удовлетворяющего уравнению 2.6, при помощи вектора z, удовлетворяющего уравнению 2.7.

Для решения задачи коррекции можно применить два подхода: вариант оценивания и вариант введения обратных связей. Подходы подробно описаны в [7], [25].

- Вариант оценивания. При таком подходе предполагается автономность работы алгоритма навигации. На вход алгоритма поступают позиционные и скоростные навигационные данные от БИНС и датчиков внешней информации. Для решения задачи оценивания применяется фильтр Калмана ([29], [24]).

- Вариант с введением обратных связей. При помощи вектора коррекции в систему вводятся обратные связи – в правые части модельных уравнений добавляются корректирующие сигналы с целью минимизации ошибок БИНС. Далее решается задача минимизации ошибок оценки.

  Указанные подходы являются информационно эквивалентными и обеспечивают одинаковую точность решения задачи.

Для решения задачи коррекции необходимо ввести следующие математические модели:

- модельные уравнения БИНС;
- уравнения ошибок БИНС;
- модели инструментальных погрешностей;
- уравнения корректирующих измерений;
- модели корректирующих поправок к выходной информации.

2.2 Модельные уравнения БИНС

При описании БИНС используются следующие системы координат:

1. Инерциальный трехгранник $O\xi_1\xi_2\xi_3$ $(O\xi)$ с началом O в центре Земли. Его ось $O\xi_1$ направлена на точку весеннего равноденствия, ось $O\xi_3$ — ось вращения Земли, направленная на север, а плоскость $O\xi_1\xi_2$ совпадает с плоскостью земного экватора;

2. Гринвичский трехгранник $O\eta$, жестко связанный с Землей. Ось $O\eta_3$ — ось вращения Земли, плоскость $O\eta_1\eta_2$ совпадает с плоскостью экватора, плоскость $O\eta_1\eta_3$ — плоскость гринвичского меридиана. Переход от инерциального к гринвичскому трехграннику определяется поворотом:

$$O\xi \quad \xrightarrow[3]{ut+\Lambda_0} \quad O\eta,$$

где u — модуль угловой скорости вращения Земли, t — время движения, Λ_0 — угол между осями $O\xi_1$ и $O\eta_1$ в начальный момент времени $t = 0$;

3. Географический трехгранник Ox^0, жестко связанный с географической вертикалью: ось Ox_1^0 касается проходящей через точку M параллели и направлена на восток, ось Ox_2^0 лежит в меридиональной плоскости и направлена на север, ось Ox_3^0 противоположна по направлению вектору силы тяжести. Вектор угловой скорости трехгранника Ox^0 — вектор угловой скорости вращения Земли — обозначен символом u_x;

4. Опорный трехгранник Ox, жестко связанный с географической вертикалью и получающийся из трехгранника Ox^0 поворотом против часовой стрелки на угол χ вокруг оси Ox_3^0, при этом ориентация в азимуте определена соотношением $\Omega_3 \equiv 0$;

5. Приборный трехгранник БИНС Mz, в котором M — точка расположения приведенной чувствительной массы ньютонометров, а оси с точностью до инструментальных погрешностей совпадают с осями чувствительности ньютонометров и ДУС. В проекциях на оси приборного трехгранника измеряется внешняя сила f'_z и его угловая скорость ω'_z:

$$f'_z = f_z + \Delta f_z, \tag{2.8}$$

$$\omega'_z = \omega_z + \nu_z, \tag{2.9}$$

где $\Delta f_z = (\Delta f_{z_1}, \Delta f_{z_2}, \Delta f_{z_3})^T$ — вектор погрешности измерений ньютонометров, $\nu_z = (\nu_{z_1}, \nu_{z_2}, \nu_{z_3})^T$ — вектор погрешности измерений ДУС. Трехгранник Mz сохраняет неизменной свою ориентацию в инерциальном пространстве, если на трехгранник не оказывается никакого воздействия;

6. Модельный трехгранник Oy — числовой образ приборного трехгранника Mz, полученный в вычислителе БИНС в результате решения навигационной задачи;

7. Квазимодельный трехгранник Oy^x как числовой образ опорного трехгранника Ox. L_y — матрица ориентации модельного трехгранника Oy относительно квазимодельного Oy^x;

8. Квазиприборный трехгранник Mz^x, на оси которого перепроектируются результаты измерения внешней силы f_z.

Широта φ — угол между осью Mx_3 и экваториальной плоскостью $O\eta_1\eta_2$, отсчитываемый от экваториальной плоскости по направлению к северу. Долгота λ — угол между проекцией оси Ox_3 на экваториальную плоскость и осью $O\eta_1$, отсчитываемый по направлению на восток. Высота h — длина проекции точки M на поверхность земного эллипсоида.

Матрица ориентации $L_{xz}(l_{ij})$ опорного трехгранника Mx относительно приборного трехгранника Mz имеет вид

$$L_{xz} = \begin{pmatrix} -\sin\psi\cos\vartheta & \cos\psi\sin\gamma + \sin\psi\sin\vartheta\cos\gamma & \cos\psi\cos\gamma - \sin\psi\sin\vartheta\sin\gamma \\ \cos\psi\cos\vartheta & \sin\psi\sin\gamma - \cos\psi\sin\vartheta\cos\gamma & \sin\psi\cos\gamma + \cos\psi\sin\vartheta\sin\gamma \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta\cos\gamma & -\cos\vartheta\sin\gamma \end{pmatrix}.$$

Ориентации опорного трехгранника Mx относительно гринвичского трехгранника $O\eta$ определяется матрицей $B_{x\eta}(b_{ij})$:

$$B_{x\eta} = \begin{pmatrix} -\sin\lambda\cos\chi - \cos\lambda\sin\varphi\sin\chi & -\sin\lambda\sin\varphi\sin\chi + \cos\lambda\cos\chi & \cos\varphi\sin\chi \\ \sin\lambda\sin\chi - \cos\lambda\sin\varphi\cos\chi & -\sin\lambda\sin\varphi\cos\chi - \cos\lambda\sin\chi & \cos\varphi\cos\chi \\ \cos\lambda\cos\varphi & \sin\lambda\cos\varphi & \sin\varphi \end{pmatrix}.$$

Введем вектор X — вектор независимых параметров, описывающий состояние системы «Материальная точка — Приборный трехгранник»:

$$X' = (\varphi', \lambda', h', V'_1, V'_2, V'_3, \gamma', \theta', \psi')^T,$$

где V'_1, V'_2, V'_3 — составляющие относительной скорости в проекциях на оси модельного трехгранника.

Для построения алгоритма коррекции БИНС остановимся на одном варианте модельных уравнений инерциальной навигации, а именно, уравнениях, использующих относительные линейные скорости, в качестве опорного трехгранника — географический трехгранник с географической азимутальной ориентацией, и в качестве параметров ориентации — элементы матриц направляющих косинусов. Очевидно, что переход к иным моделям инерциальной навигации от базовой модели может быть сделан с помощью простых алгебраических операций.

Согласно [6] модельные уравнения, записанные в осях географического трехгранника Mx имеют вид:

$$
\begin{aligned}
\dot{V}_x' &= \left(\hat{\Omega}_x' + 2\hat{u}_x'\right) V_x' + f_x' + g_x' \\
g &= g_0 \frac{(1+\beta\sin\varphi')a^2}{(a+h')^2}, \\
u_x' &= \left(0,\ u\cos\varphi',\ u\sin\varphi'\right)^T \\
\Omega_x' &= (-\frac{V_2'}{a+h'}, \frac{V_1'}{a+h'}, \frac{V_1'\tan\varphi'}{a+h'}) \\
f_x' &= L_{xz}' f_z', \\
\dot{L}_{xz}'^T &= \widehat{\omega}_z' L_{xz}'^T - L_{xz}'^T(\widehat{u}_x' + \widehat{\Omega}_x'), \\
\dot{B}_{x\eta}' &= \widehat{\Omega}_x' B_{x\eta}' \\
\gamma' &= \operatorname{arctg}\frac{l_{33}}{l_{31}}, \\
\vartheta' &= \operatorname{arctg}\frac{l_{31}}{\sqrt{l_{33}^2 + l_{32}^2}}, \\
\psi' &= \operatorname{arctg}\frac{l_{11}}{l_{21}} \\
\lambda' &= \operatorname{arctg}\frac{b_{32}}{b_{31}}, \\
\varphi' &= \operatorname{arctg}\frac{b_{33}}{\sqrt{b_{12}^2 + b_{23}^2}},
\end{aligned}
\tag{2.10}
$$

Численная реализация решения задачи ориентации БИНС может базироваться на алгоритмах различного рода. Параметры ориентации обычно рассчитываются исходя из решения уравнений Пуассона (или методом кватернионов поворота), поэтому вектор состояния модельных уравнений, как правило, включает в себя зависимые переменные, обусловленные конкретным способом решения уравнений БИНС. Например, модельные уравнения (2.10) содержат соотношения, описывающие ори-

ентацию модельного трёхгранника:

$$\begin{aligned}\dot{B}'_{x\eta} &= \widehat{\Omega}'_x B'_{x\eta} \\ \dot{L}'^T_{xz} &= \widehat{\omega}'_z L'^T_{xz} - L'^T_{xz}(\widehat{u}'_x + \widehat{\Omega}'_x)\end{aligned}$$

Вектор состояния Y – вектор переменных, относительно которых решается замкнутая система дифференциальных уравнений в форме Коши, содержит следующие компоненты:

$$Y' = (V'_1, V'_2, V'_3, b'^T_1, b'^T_2, l'^T_1, l'^T_2)^T \tag{2.11}$$

Здесь b'_1, b'_2, l'_1, l'_2 — столбцы матриц ориентации $B'_{x\eta}, L'_{xz}$.

Однако, важно отметить, что для любого вектора Y существуют соотношения:

$$X = \Psi^x(Y), \quad Y = \phi^y(X)$$

Фукнция $X = \Psi^x(Y)$ выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\gamma' &= \operatorname{arctg}\frac{l_{33}}{l_{31}}, \\ \vartheta' &= \operatorname{arctg}\frac{l_{31}}{\sqrt{l_{33}^2 + l_{32}^2}}, \\ \psi' &= \operatorname{arctg}\frac{l_{11}}{l_{21}} \\ \lambda' &= \operatorname{arctg}\frac{b_{32}}{b_{31}}, \\ \varphi' &= \operatorname{arctg}\frac{b_{33}}{\sqrt{b_{12}^2 + b_{23}^2}}.\end{aligned}$$

2.3 Уравнения ошибок БИНС

Мерой ошибки в определении координат и скорости движения объекта служат векторы, определяющие движение и скорость модельной точки M' относительно истинной точки M.

Мерой ошибки ориентации служит угол поворота приборного трехгранника относительно модельного.

Уравнения ошибок, то есть уравнения движения точки M' относительно точки M и модельного трехгранника относительно приборного, представляют собой систему из 9 дифференциальных уравнений.

Взаимная ориентация модельного и приборного трехгранников задается 3 компонентами вектора малого поворота, а следовательно, удовлетворяет системе из 3 дифференциальных уравнений.

Следуя [6], при описании ошибок БИНС будем использовать понятия динамической, кинематической и полной ошибок. Полной ошибкой определения вектора l называется величина $\Delta l = l'_y - l_y$.

Кинематическая ошибка определяется как вектор малого поворота β_y между приборным и модельным трехгранниками:

$$l_z = (E + \hat{\beta}_y) l_y$$

Кинематическая ошибка подчиняется уравнению Пуассона "в малом":

$$\dot{\beta}_y = \hat{\omega}_y \beta_y + \nu_z \tag{2.12}$$

Введем величину β_x — вектор малого поворота приборного трехгранника Mz^x относительно квазимодельного My^x. Эта величина удовлетво-

ряет следующим соотношениям:

$$\beta_x = L_{xz}\beta_y,$$

$$\dot{\beta}_x = \hat{\omega}'_x\beta_x + \nu_x, \quad \nu_x = L_{xz}\nu_z, \tag{2.13}$$

Уравнение 2.12 или, в силу эквивалентности, 2.13 называется кинематическим уравнением ошибок.

Динамической ошибкой называется величина $\delta l = l'_{y^x} - l_{z^x}$.

Обозначим вектором $x = (x_1, x_2, x_3)^T$ координаты точки M в трехграннике Ox, вектором $y = (y_1, y_2, y_3)^T$ — координаты той же точки в квазимодельном трехграннике Oy^x, вектором $z = (z_1, z_2, z_3)^T$ — в квазиприборном трехграннике Oz^x. Координаты модельной точки M' в квазимодельном трехграннике обозначим вектором $y' = (y'_1, y'_2, y'_3)^T$.

Ошибка определения местоположения точки M — вектор $\Delta y = (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3)^T$ — задается равенством

$$\Delta y = y' - y.$$

Также эту величину можно записать в виде

$$\Delta y = \delta y + \hat{\beta}_x x,$$

где $\delta y = y' - z$ — динамическая ошибка.

Таким образом, полная ошибка определения координат точки M является суммой динамической и кинематической ошибок.

Для ошибки определения относительной линейной скорости имеем

$$\Delta V_y = \delta V_y + \hat{\beta}_y V_y$$

Поведение ошибок БИНС описывается в трехграннике Mx, связанном с текущей географической вертикалью (ось Mx_3), и ориентированном определенным образом в азимуте. Перед составлением уравнений ошибок выбирается следующий набор независимых переменных (индекс обозначает проектирование на соответствующую ось трехгранника Mx):

- $\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3$ — полные ошибки местоположения:

$$\Delta y = y' - y$$

- $\delta V_1, \delta V_2, \delta V_3$ — динамические ошибки определения горизонтальных составляющих V_1, V_2, V_3 относительной скорости движения;

- $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — кинематические ошибки, вектор $\beta_x = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ — вектор малого поворота квазиприборного трехгранника Mz^x относительно квазимодельного Mx'.

В этих переменных уравнения ошибок имеют вид:

$$\begin{aligned}
&\Delta\dot{y}_1 = \delta V_1 + \beta_3 V_2 - \beta_2 V_3,\\
&\Delta\dot{y}_2 = \delta V_2 - \beta_3 V_1 + \beta_1 V_3,\\
&\Delta\dot{y}_3 = \delta V_3 + \beta_2 V_1 - \beta_1 V_2,\\
&\delta\dot{V}_1 = 2u_3\delta V_2 - 2u_2\delta V_3 - \omega_0^2\Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1,\\
&\delta\dot{V}_2 = -2u_3\delta V_1 + 2u_1\delta V_3 - \omega_0^2\Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2,\\
&\delta\dot{V}_3 = -2u_1\delta V_2 + 2u_2\delta V_1 + 2\omega_0^2\Delta y_3 + \Delta f_3,\\
&\dot{\beta}_1 = \omega_3\beta_2 - \omega_2\beta_3 + \nu_1,\\
&\dot{\beta}_2 = -\omega_3\beta_1 + \omega_1\beta_3 + \nu_2,\\
&\dot{\beta}_3 = \omega_2\beta_1 - \omega_1\beta_2 + \nu_3,
\end{aligned} \tag{2.14}$$

где $\nu_x = (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T = L_{xz}\nu_z, \Delta f_x = L_{xz}\Delta f_z$, $w_0^2 = \frac{g}{R} = 1.25 \cdot 10^{-3}$ 1/сек — частота Шулера. С точностью до членов второго порядка малости можно использовать матрицу L, определяемую в бортовом вычислителе БИНС.

Замечание. Обычно при решении задач навигации в авиации используется двухкомпонентная форма (исключаются уравнения для (Δy_3, δV_3). Но в описанной постановке задача решается в обратных связях, всегда используется внешняя информация о глубине, и для ошибок оценки неустойчивость вертикального канала ошибок БИНС не важна, так как имеется наблюдаемость вертикального канала при помощи информации о глубине.

2.4 Модель инструментальных погрешностей БИНС

Предполагается, что БИНС, установленная на аппарате, прошла этап калибровки на стенде, поэтому в моделях инструментальных погрешностей учитываются только те компоненты, которые могут меняться от запуска к запуску.

Собственные инструментальные погрешности каждого из ньютонометров включают в себя постоянную составляющую — $\Delta f_z^0 = (\Delta f_{z_1}^0, \Delta f_{z_2}^0, \Delta f_{z_3}^0)$ и высокочастотную составляющую — $\Delta f_z^s = (\Delta f_{z_1}^s, \Delta f_{z_2}^s, \Delta f_{z_3}^s)$, которая считается белым шумом. С учетом сказанного, вектор инструментальных погрешностей имеет следующий вид:

$$\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Delta f_z^s.$$

Для погрешностей ДУС принимается аналогичная модель:

$$\nu_z = \nu_z^0 + \nu_z^s,$$

где $\nu_z^0 = (\nu_{z_1}^0, \nu_{z_2}^0, \nu_{z_3}^0)$, $\nu_z^s = ({\nu_{z_1}}^s, {\nu_{z_2}}^s, {\nu_{z_3}}^s)$. Для исследования основных свойств системы выбрана упрощенная модель инструментальных погрешностей, которая оказывается достаточной.

2.5 Уравнения корректирующих измерений

В качестве датчиков дополнительной навигационной информации используются гидроакустический датчик дальности до наводного маяка с известными координатами, доплеровский лаг и глубиномер.

Информация о дальности

Информация W^D о дальности до маяка поступает от гидроакустической навигационной системы подводного аппарата. Она определяется на основе обработки амплитудно-фазовой информации, при этом используется алгоритм вычисления расстояния по измеренному времени распространения сигнала. Имеем:

$$W^\rho = \rho + \rho^D,$$

где ρ — истинное расстояние до маяка, ρ^D — погрешность измерения расстояния. Известные координаты маяка можно спроектировать в опорный трехгранник. Расстояние до маяка можно определить следующим образом. Пусть $(\lambda^M, \varphi^M, h^M)$ — координаты маяка в системе координат Mx, а $({y_1}^M, {y_2}^M, {y_3}^M)$ — в модельном My. Тогда верны следующие соотно-

шения:

$$
\begin{aligned}
{y_1}^M &= (\lambda^M - \lambda') \cdot a \cdot \cos\varphi, \\
{y_2}^M &= (\varphi^M - \varphi') \cdot a, \\
{y_3}^M &= h^M - h'.
\end{aligned}
$$

Расстояние от АПА до маяка в таком случае будет равно ρ^*:

$$\rho^* = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} {y_i}^{M^2}}.$$

Тогда корректирующее измерение z^D формируется следующим способом:

$$z^D = W^D - \rho^* = d^T \Delta y + \rho^D,$$

где $d = (\frac{{y_1}^M}{\rho^*}, \frac{{y_2}^M}{\rho^*}, \frac{{y_3}^M}{\rho^*})$.

Погрешность измерения дальности включает в себя систематическую составляющую — ρ^{D^0} и высокочастотную погрешность типа белого шума — ρ^{D^S}:

$$\rho^D = \rho^{D^0} + \rho^{D^S}.$$

Информация о глубине погружения

При помощи датчика глубины погружения измеряется информация W^H о глубине погружения аппарата:

$$W^H = h + \rho^H,$$

здесь h — глубина погружения, ρ^{H^S} — высокочастотная погрешность типа белого шума. Корректирующее измерение z^H вычисляется при помощи следующего соотношения:

$$z^H = h' - W^H = \Delta y_3 + \rho^{H^S},$$

где h' — вычисленное значение высоты.

Информация о скорости

При помощи лага измеряется скорость движения аппарата W^V относительно дна или толщи воды в зависимости от типа датчика. Принцип действия доплеровского датчика заключается в измерении временного сдвига между отраженным от грунта акустическим сигналом, принятым на установленную на корпусе аппарата многолучевую антенну. Информация от лага представляет собой две компоненты относительной скорости объекта — проекции на продольную и поперечную оси. В зависимости от глубины лаг работает в двух режимах — измерения скорости относительно дна или относительно толщи воды. Во втором случае в погрешность измерений лага необходимо включать скорость течения.

Для описания модели измерений от лага нам понадобится система координат, связанная с объектом. Введем систему координат Mr, связанную с корпусом АПА таким образом, чтобы ось Mr_1 была направлена по продольной оси АПА, ось Mr_2 — направлена вверх, ось Mr_3 — по правому борту. Измерения лага W_1^V, W_2^V относятся к осям Mr.

$$W_1^V = V_{r_1} + \rho_1^V,$$
$$W_2^V = V_{r_3} + \rho_2^V.$$

Введем вектор малого поворота $\chi = (\chi_1, \chi_2, \chi_3)$, характеризующий взаимную ориентацию трехгранника Mr и трехгранника Mz, а также остаточные погрешности их взаимной юстировки. Имеем:

$$V_r = (E + \hat{\chi})V_z.$$

Образуем измерения:

$$\begin{aligned}
z_1^V &= V'_{y_1} - W_1^V = V'_{y_1} - V_{r_1} - \rho_1^V = V'_{y_1} - V_{z_1} - \chi_3 V_{z_2} + \chi_2 V_{z_3} - \rho_1^V = \\
&= \delta V_{z_1} - \chi_3 V_{z_2} + \chi_2 V_{z_3} - \rho_1^V, \\
z_2^V &= V'_{y_3} - W_2^V = V'_{y_3} - V_{r_3} - \rho_2^V = V'_{y_3} - V_{z_3} - \chi_2 V_{z_1} + \chi_1 V_{z_2} - \rho_2^V = \\
&= \delta V_{z_3} - \chi_2 V_{z_1} + \chi_1 V_{z_2} - \rho_2^V.
\end{aligned}$$

В силу малой относительной скорости движения АПА составляющими, содержащими погрешности взаимной ориентации приборного трехгранника относительно связанного, можно пренебречь. Тогда измерения примут вид:

$$\begin{aligned}
z_1^V &= \delta V_{z_1} - \rho_1^V = l_{11}\delta V_1 + l_{12}\delta V_2 + l_{13}\delta V_3 - \rho_1^V, \\
z_2^V &= \delta V_{z_3} - \rho_2^V = l_{31}\delta V_1 + l_{32}\delta V_2 + l_{33}\delta V_3 - \rho_2^V.
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Для завершения описания модели измерений лага конкретизируем вид погрешности измерений в двух случаях — измерения компонент скорости относительно дна и измерения таковых относительно толщи воды.

В первом случае в модель погрешностей включаем аддитивную составляющую, обусловленную ошибкой масштабного коэффициента, и высокочастотную составляющую типа белого шума:

$$\begin{aligned}
\rho_1^V &= k^V V_{z_1} + \rho_1^{V^S}, \\
\rho_2^V &= k^V V_{z_3} + \rho_2^{V^S},
\end{aligned} \tag{2.16}$$

где k^V — масштабный коэффициент.

Для случая измерения скорости относительно толщи воды опишем скорость течения двумя горизонтальными составляющими в трехграннике M_x:

$$V_x^{str} = (V_1^{str}, V_2^{str}, 0)^T.$$

Тогда модель измерений лага будет иметь вид:

$$z_1^V = \delta V_{z_1} - \rho_1^V = l_{11}\delta V_1 + l_{12}\delta V_2 + l_{13}\delta V_3 - l_{11}V_1^{str} + l_{12}V_2^{str} - \rho_1^V,$$
$$z_2^V = \delta V_{z_3} - \rho_2^V = l_{31}\delta V_1 + l_{32}\delta V_2 + l_{33}\delta V_3 - l_{31}V_1^{str} + l_{32}V_2^{str} - \rho_2^V.$$

Далее в работе рассматривается случай измерения скорости относительно дна и в основу берутся уравнения измерений 2.15 и модель погрешностей измерений 2.16.

2.6 Вектор состояния уравнения ошибок БИНС

Учитывая вышесказанное, мы имеем следующую систему, описывающую ошибки БИНС:

$$
\begin{aligned}
&\Delta\dot{y}_1 = \delta V_1 + \beta_3 V_2 - \beta_2 V_3,\\
&\Delta\dot{y}_2 = \delta V_2 - \beta_3 V_1 + \beta_1 V_3,\\
&\Delta\dot{y}_3 = \delta V_3 + \beta_2 V_1 - \beta_1 V_2,\\
&\delta\dot{V}_1 = 2u_3\delta V_2 - 2u_2\delta V_3 - \omega_0^2\Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1,\\
&\delta\dot{V}_2 = -2u_3\delta V_1 + 2u_1\delta V_3 - \omega_0^2\Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2,\\
&\delta\dot{V}_3 = -2u_1\delta V_2 + 2u_2\delta V_1 + 2\omega_0^2\Delta y_3 + \Delta f_3,\\
&\dot{\beta}_1 = \omega_3\beta_2 - \omega_2\beta_3 + \nu_1,\\
&\dot{\beta}_2 = -\omega_3\beta_1 + \omega_1\beta_3 + \nu_2,\\
&\dot{\beta}_3 = \omega_2\beta_1 - \omega_1\beta_2 + \nu_3,\\
&\nu_x = (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T = L_{xz}\nu_z,\\
&\Delta f_x = (\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3)^T = L_{xz}\Delta f_z,\\
&\nu_z = \nu_z^0 + \nu_z^s,\\
&\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Delta f_z^s,\\
&\dot{\nu}_z^0 = 0,\\
&\dot{\Delta f}_z^0 = 0.
\end{aligned}
\tag{2.17}
$$

Вектор коррекции z включает в себя компоненты $z = (z^D, z^H, z_1^V, z_2^V)^T$:

$$
\begin{aligned}
z^D &= d^T \Delta y + \rho^{D^0} + \rho^{D^S}, \\
z^H &= \Delta y_3 + \rho^{H^S}, \\
z_1^V &= l_{11}\delta V_1 + l_{12}\delta V_2 - l_{13}\delta V_3 - k^V V_{z_1} + \rho_1^{V^S}, \\
z_2^V &= l_{31}\delta V_1 + l_{32}\delta V_2 - l_{33}\delta V_3 - k^V V_{z_3} + \rho_2^{V^S}.
\end{aligned} \tag{2.18}
$$

Вектор состояния системы уравнений ошибок БИНС (2.17) с измерениями (2.18) имеет вид:

$$
\begin{aligned}
\kappa = (&\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \\
&\nu_{z1}, \nu_{z2}, \nu_{z3}, \Delta f^0_{z\,1}, \Delta f^0_{z\,2}, \Delta f^0_{z\,3}, \rho^{D^0}, k^V)^T
\end{aligned} \tag{2.19}
$$

2.7 Модели корректирующих поправок к выходной информации

Задача коррекции БИНС решается как задача оценки ошибки вектора состояния модельных уравнений, связанного с вектором состояния уравнений ошибок линейным преобразованием:

$$
x = X - X' = C\kappa \tag{2.20}
$$

При этом вектор x имеет следующий вид:

$$
x = (\Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta\theta, \Delta\gamma, \Delta\psi) \tag{2.21}
$$

Выразим компоненты вектора x через компоненты вектором состояния уравнений ошибок κ:

$$
\begin{aligned}
&\Delta\varphi = \frac{\Delta y_2}{a+h'},\\
&\Delta\lambda = \frac{\Delta y_1}{(a+h')\cos\varphi},\\
&\Delta h = \Delta y_3,\\
&\Delta V_1 = \delta V_1 + V_2\beta_2 + V_3(\frac{\Delta y_1}{a} - \beta_2),\\
&\Delta V_2 = \delta V_2 - V_1\beta_3 + V_3(\frac{\Delta y_2}{a} + \beta_1),\\
&\Delta V_3 = \delta V_3 + V_1(-\frac{\Delta y_1}{a} + \beta_2) + V_2(- \ \frac{\Delta y_2}{a} - \beta_1),\\
&\Delta\theta = -\beta_1\cos\psi - \beta_2\sin\psi,\\
&\Delta\gamma = \frac{1}{\cos\theta}(\beta_1\sin\psi - \beta\cos\psi),\\
&\Delta\psi = -\beta_3 - \Delta\lambda\sin\varphi - \Delta\gamma\sin\theta
\end{aligned}
\tag{2.22}
$$

2.8 Алгоритм коррекции

Подробное описание алгоритма коррекции с введением обратных связей приведено в [25], [1]. Опишем его структуру в дискретном виде.

1. От блока чувствительных элементов БИНС поступает информация об измеренных составляющих удельной силы и угловой скорости приборного трехгранника:

$$U'_j = (\omega'_z, f'_z).$$

2. Задается информация о начальном состоянии X'_0 и вычисляются начальные условия модельных уравнений 2.10:

$$X'_0 = X'_{j=0}, \quad Y'_0 = \phi^y(X'_0).$$

3. В вычислителе БИНС решаются модельные уравнения 2.10:

$$Y_j^- = F_j^y(Y_{j-1}^+, U_j'), \quad Y_{j=0}' = \phi^y(X_0').$$

На выход подается вычисленный вектор X_j^-:

$$X_j^- = \Psi^x(Y_j^-).$$

4. От датчиков внешней информации поступают данные, при помощи которых формируется вектор измерений Z_j:

$$Z_j = \Theta(X_j) + r$$

5. На вход фильтра Калмана подается вектор X_j^-, вычисленный БИНС, и вектор коррекции Z_j. Далее вычисляется оценка вектора состояния уравнений ошибок $\widetilde{\kappa}_j^+$.

6. С учетом информации о $\widetilde{\kappa}_j^+$ рассчитывается вектор $\widetilde{X}_j^+$ (2.20):

$$\widetilde{X}_j^+ = \widetilde{X}_j^- - C\widetilde{\kappa}_j^+$$

7. Значение $\widetilde{X}_j^+$ вводятся в модельные уравнения обратной связью из алгоритма фильтра Калмана. Вектор $\widetilde{X}_j^+$ преобразуется в $\widetilde{Y}_j^+$ (2.12):

$$Y_j^+ = \phi^y(\widetilde{X}_j^+).$$

Также происходит обнуление оценки вектора состояния уравнений ошибок $\widetilde{\kappa}_j$:

$$\widetilde{\kappa}_j = 0.$$

Схема алгоритма коррекции приведена на Рисунке 2.1.

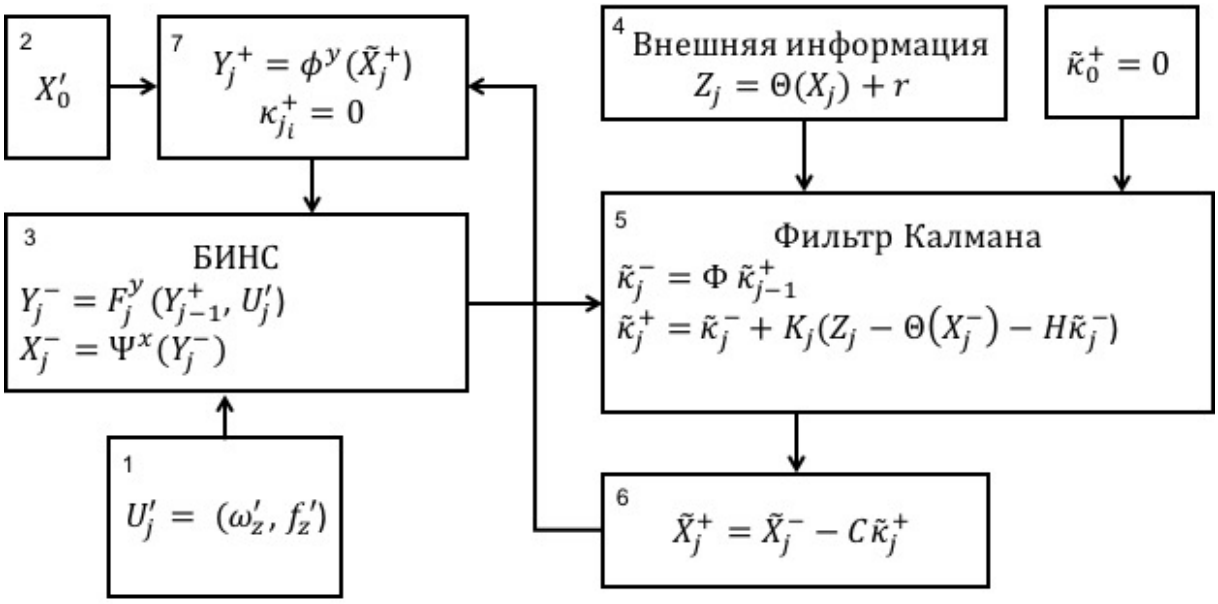

Рисунок 2.1: Схема алгоритма коррекции

2.9 Выводы

Построен алгоритм навигации АПА, в котором данные БИНС используются в качестве основной информации, а данные ГАНС, лага и глубиномера — в качестве корректирующей. Приведены модельные уравнения, уравнения ошибок, введены модели инструментальных погрешностей, выведены уравнения корректирующих измерений. Описана задача коррекция БИНС в варианте введения обратных связей.

Глава 3

Анализ точности построенного алгоритма навигации АПА

В главе проводится ковариационный анализ точности алгоритма коррекции БИНС АПА. Этот анализ по существу служит основным средством, позволяющим судить о потенциальных возможностях алгоритма. Аналитическое исследование в данном случае нереализуемо.

Анализ проводится при условиях, приближенных к реальным. А именно, принятые характеристики погрешностей всех датчиков заданы в рамках существующих на данный момент, а также использованы типовые траектории АПА и АВА, из которых можно построить любую траекторию, пригодную для выполнения миссии.

Для проверки работоспособности построенного алгоритма навигации подводного робота проведено его моделирование в реализациях с использованием комбинации реальных данных и имитационных моделей движения. В главе описывается схема моделирования, использованные данные и результаты моделирования.

3.1 Ковариационный анализ задачи коррекции БИНС АПА

Уравнения ошибок БИНС имеют вид (2.17):

$$
\begin{aligned}
&\Delta\dot{y}_1 = \delta V_1 + \beta_3 V_2 - \beta_2 V_3,\\
&\Delta\dot{y}_2 = \delta V_2 - \beta_3 V_1 + \beta_1 V_3,\\
&\Delta\dot{y}_3 = \delta V_3 + \beta_2 V_1 - \beta_1 V_2,\\
&\delta\dot{V}_1 = 2u_3\delta V_2 - 2u_2\delta V_3 - \omega_0^2\Delta y_1 - \beta_2 g + \Delta f_1,\\
&\delta\dot{V}_2 = -2u_3\delta V_1 + 2u_1\delta V_3 - \omega_0^2\Delta y_2 + \beta_1 g + \Delta f_2,\\
&\delta\dot{V}_3 = -2u_1\delta V_2 + 2u_2\delta V_1 + 2\omega_0^2\Delta y_3 + \Delta f_3,\\
&\dot{\beta}_1 = \omega_3\beta_2 - \omega_2\beta_3 + \nu_1,\\
&\dot{\beta}_2 = -\omega_3\beta_1 + \omega_1\beta_3 + \nu_2,\\
&\dot{\beta}_3 = \omega_2\beta_1 - \omega_1\beta_2 + \nu_3,\\
&\nu_x = (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T = L_{xz}\nu_z,\\
&\Delta f_x = (\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3)^T = L_{xz}\Delta f_z,\\
&\nu_z = \nu_z^0 + \nu_z^s,\\
&\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Delta f_z^s,\\
&\dot{\nu_z^0} = 0,\\
&\Delta\dot{f}_z^0 = 0.
\end{aligned}
$$

Вектор корректирующих измерений $z = (z^D, z^H, z_1^V, z_2^V)^T$ (2.18):

$$
\begin{aligned}
z^D &= d^T \Delta y + \rho^{D^0} + \rho^{D^S}, \\
z^H &= \Delta y_3 + \rho^{H^S}, \\
z_1^V &= l_{11}\delta V_1 + l_{12}\delta V_2 - l_{13}\delta V_3 - k^V V_{z_1} + \rho_1^{V^S}, \\
z_2^V &= l_{31}\delta V_1 + l_{32}\delta V_2 - l_{33}\delta V_3 - k^V V_{z_3} + \rho_2^{V^S}.
\end{aligned}
$$

Вектор состояния системы уравнений ошибок БИНС (2.17) с измерениями (2.18):

$$
\begin{aligned}
\kappa = (&\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \\
&\nu_{z1}, \nu_{z2}, \nu_{z3}, \Delta f_{z\,1}^0, \Delta f_{z\,2}^0, \Delta f_{z\,3}^0, \rho^{D^0}, k^V)^T
\end{aligned}
$$

Задача сводится к построению оценок вектора состояния κ при помощи вектора коррекции z, линейно зависимого от компонент вектора измерений. Для решения задачи используется фильтр Калмана, описанный в [7].

Анализ точности производился в рамках ковариационных соотношений. Были выбраны априорные стандартные отклонения погрешностей датчиков БИНС среднего класса точности:

$$
\begin{aligned}
&\sigma_{\Delta f^0} = 0.005 \text{ м/с}^2; \\
&\sigma_{\nu^0} = 10^\circ/\text{час}; \\
&\sigma_{\Delta y} = 10 \text{ м}; \\
&\sigma_{\delta V} = 0.1 \text{ м/с}; \\
&\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = 0.5^\circ; \\
&\sigma_{\beta_3} = 1^\circ; \\
&\sigma_{\rho^{D^0}} = 5 \text{ м}; \\
&\sigma_{k^V} = 0.01 \text{ (б/р)}.
\end{aligned}
\tag{3.1}
$$

Для шумов в системе и измерениях берутся следующие значения стандартных отклонений, приведенных к частоте 1 Гц.:

$$\begin{aligned}
&\sigma_{\Delta f^s} = 0.02\,\text{м/с}^2;\\
&\sigma_{\nu^s} = 90^\circ/\text{час};\\
&\sigma_{\rho^{D^s}} = 1\,\text{м};\\
&\sigma_{\rho^{V^s}} = 0.01\,\text{м/с}.
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Рассматривались следующие движения аппаратов, выбранные как основные. В первом случае АПА двигался прямолинейным галсом на постоянной глубине, а АВА двигался «зигзагом» со стороной 200 метров, пересекая при этом траекторию подводного аппарата (см. Рисунок 3.1). Во втором случае АВА двигался по траектории близкой к квадрату со стороной 200 метров по часовой стрелке, в то время как АПА шел по квадрату со стороной 100 метров против часовой стрелки (см. Рисунок 3.2). На данных движениях были проведены испытания комплекса, в том числе и навигационной системы без использования БИНС [44]. Заметим, что любую траекторию, необходимую для выполнения миссии можно составить из кусков траекторий данного типа — маршрут к месту исследования прокладывается кусками прямолинейных движений, а исследуемая область может быть покрыта квадратами со смещением. Кроме того, движение АВА обеспечивает выполнение основного условия оцениваемости координат при помощи измерения одной дальности - изменение направления объект-маяк.

Результаты ковариационного анализа при движении аппарата по траектории «Зигзаг» представлены на графиках (см. Рисунок 3.3, 3.4).

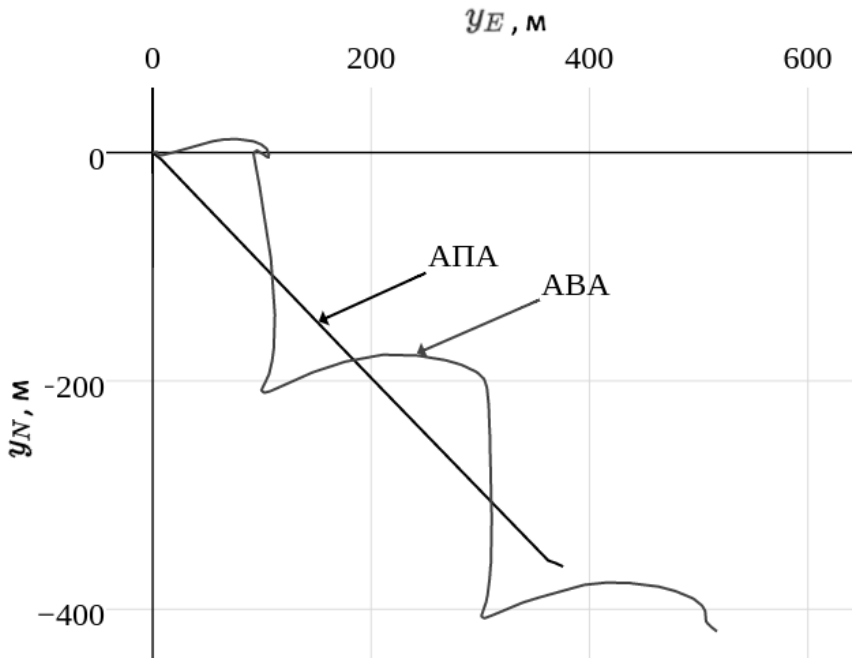

Рисунок 3.1: Движение по траектория «Зигзаг»

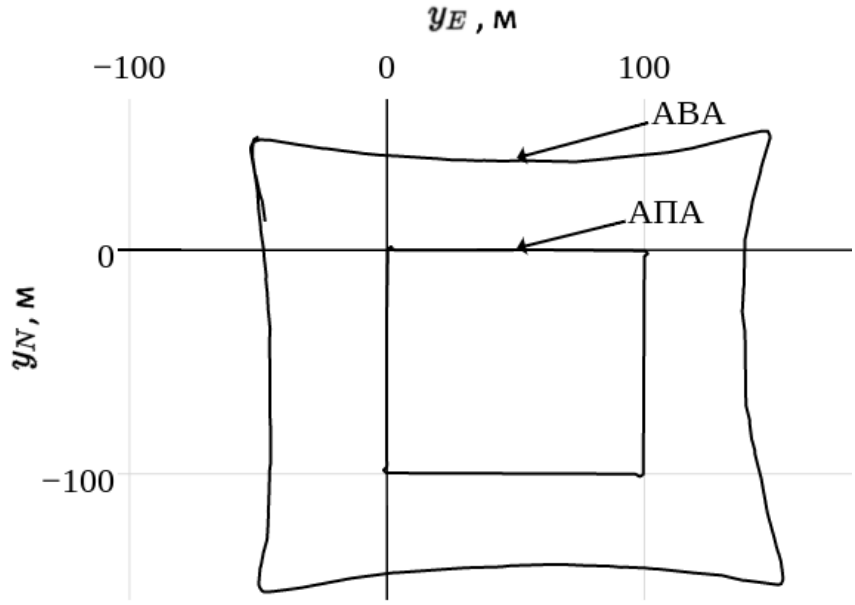

Рисунок 3.2: Движение по траектория «Квадрат»

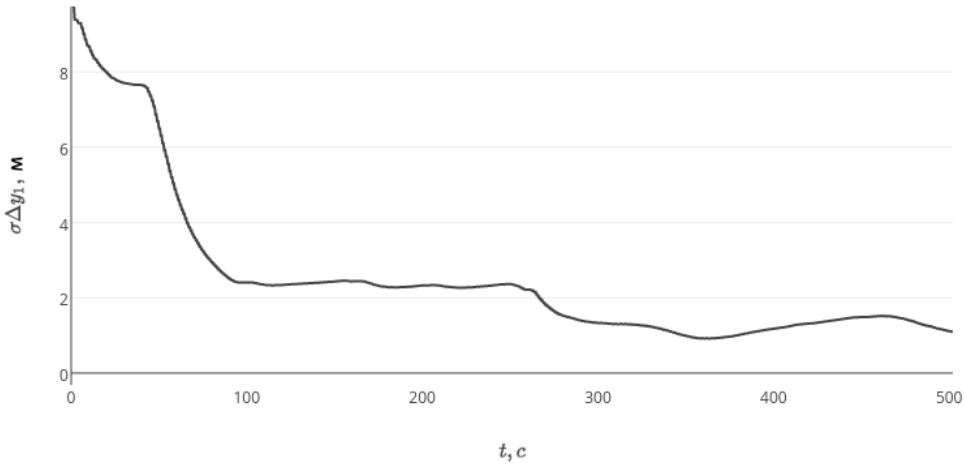

Рисунок 3.3: Зависимость СО ошибки оценки первой координаты от времени для траектории «Зигзаг»

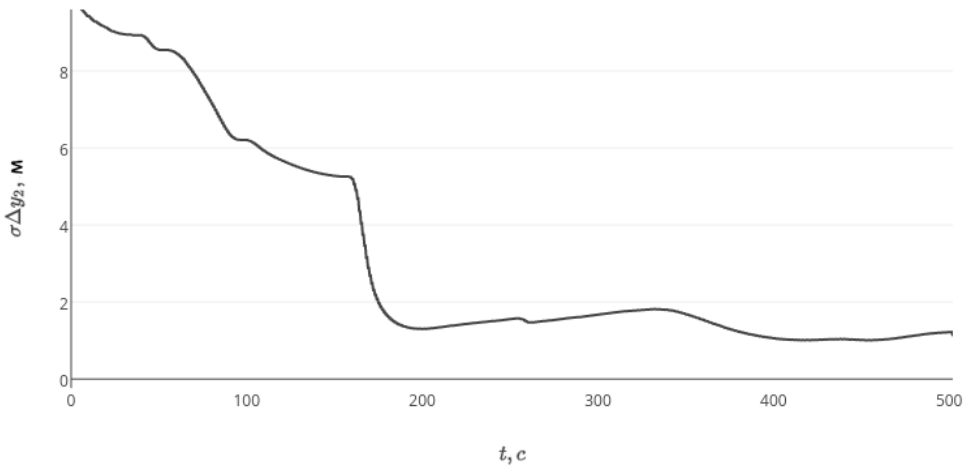

Рисунок 3.4: Зависимость СО ошибки оценки второй координаты от времени для траектории «Зигзаг»

СО ошибки оценки первой координаты (Рисунок 3.3) устанавливается на значении менее 3 метров после первых 2 минут движения аппарата, и достигает значения менее 2 метров во второй половине отрезка движения.

Для второй координаты СО ошибки оценки (Рисунок 3.4) устанавливается на значении менее 2 метров примерно во второй половине отрезка движения.

Результаты ковариационного анализа при движении аппарата по траектории «Квадрат» представлены на графиках (см. Рисунок 3.5, 3.6).

СО ошибки оценки первой координаты (Рисунок 3.5) устанавливается на значении примерно 2 метров после первых 1.5 минут движения аппарата, и достигает значения менее 2 метров во второй половине отрезка движения.

СО оценки второй координаты (Рисунок 3.6) при движении по траектории «Квадрат» устанавливается на значении менее двух метров также во второй половине отрезка движения.

Полученные результаты показывают, что использование БИНС дает возможность повысить точность примерно в 3 раза по сравнению с результатами, представленными, например, в [46]. Важно отметить причины этого обстоятельства. Именно благодаря использованию корректируемой БИНС оценивается кинематическая ошибка определения ориентации (см. Рисунки 3.7 —3.9) и за счет этого повышается точность определения координат.

На графиках 3.10, 3.11 показаны поведение СО оценки ошибки масштабного коэффициента k^V и СО ошибки оценки систематической погрешности дальности ρ_{D^0}, измеряемой ГАНС.

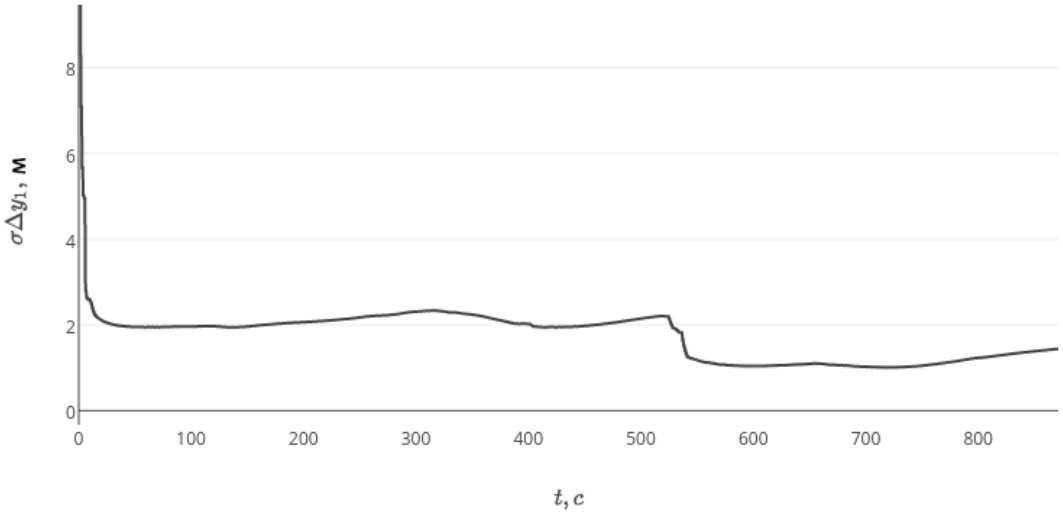

Рисунок 3.5: Зависимость СО ошибки оценки первой координаты от времени для траектории «Квадрат»

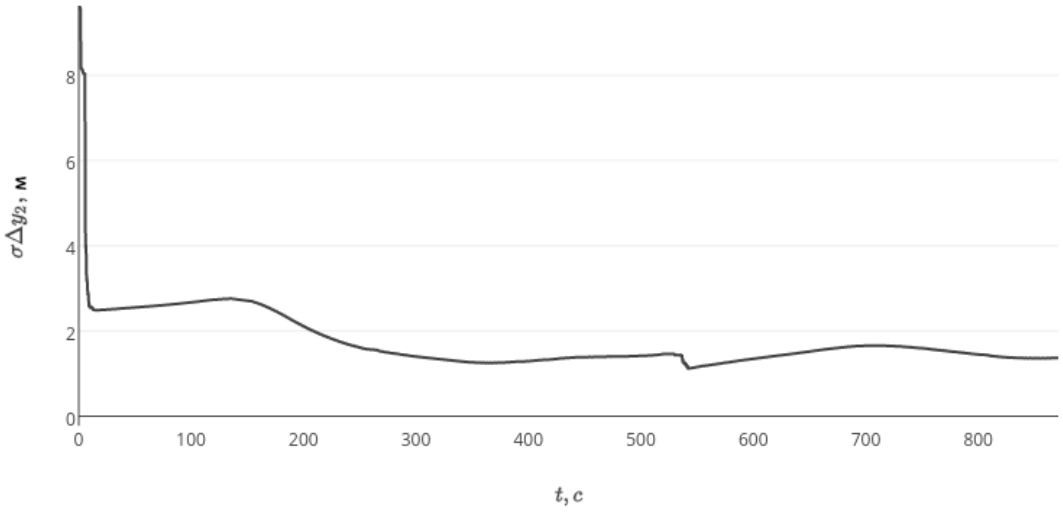

Рисунок 3.6: Зависимость СО ошибки оценки второй координаты от времени для траектории «Квадрат»

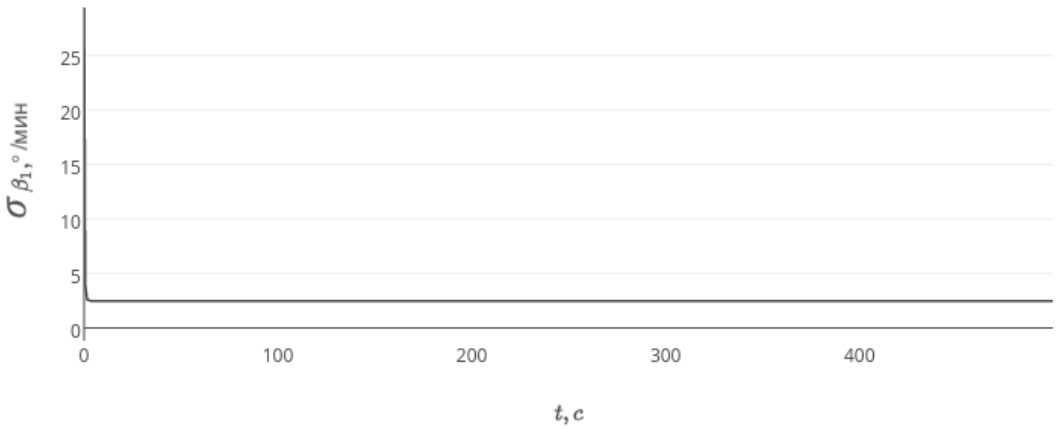

Рисунок 3.7: Зависимость СО ошибки оценки кинематической ошибки от времени для траектории «Зигзаг»

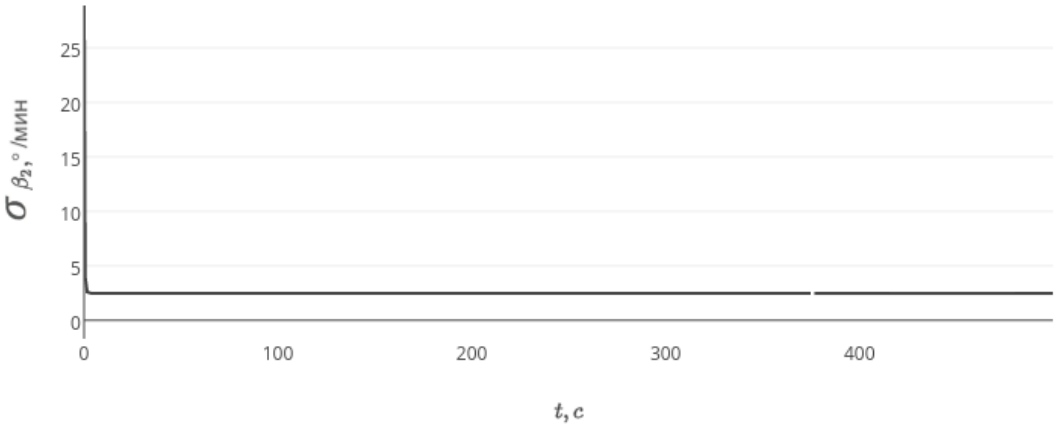

Рисунок 3.8: Зависимость СО ошибки оценки кинематической ошибки от времени для траектории «Зигзаг»

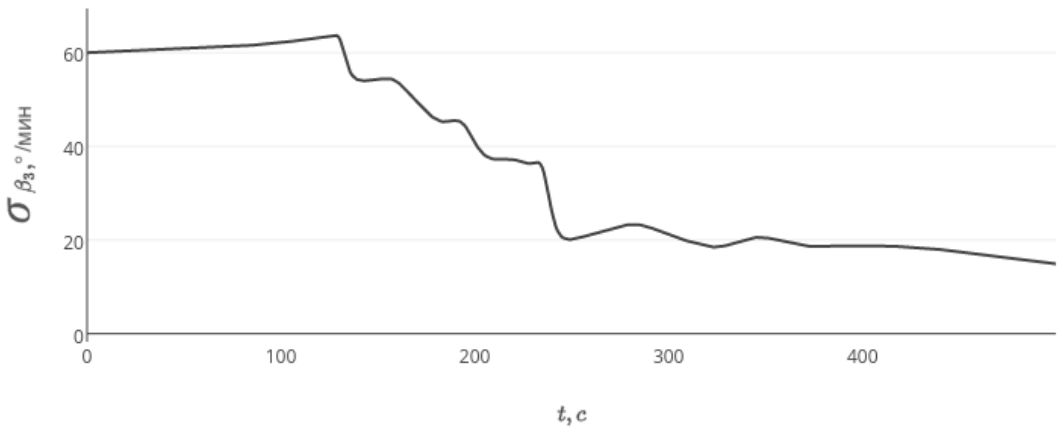

Рисунок 3.9: Зависимость СО ошибки оценки кинематической ошибки от времени для траектории «Зигзаг»

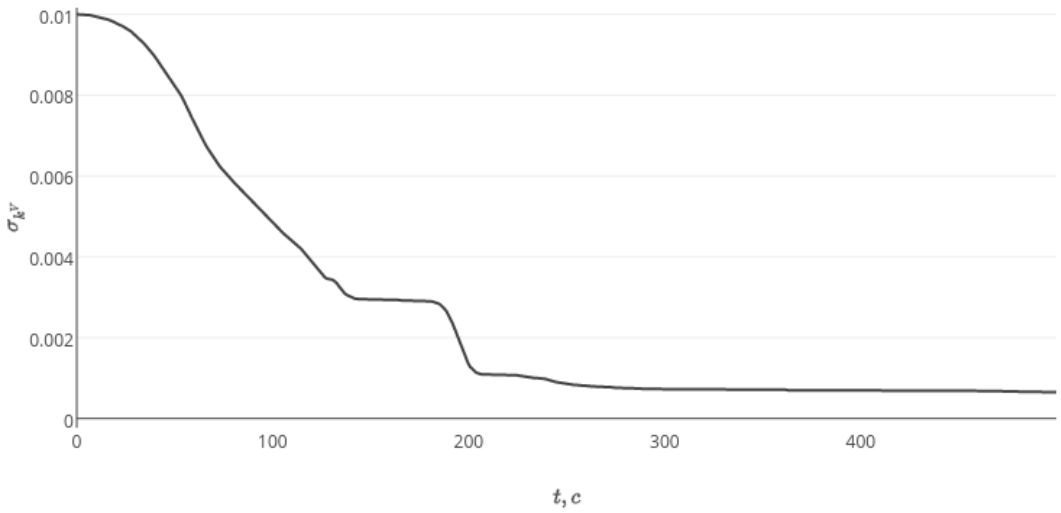

Рисунок 3.10: Зависимость СО ошибки оценки масштабного коэффициента от времени для траектории «Зигзаг»

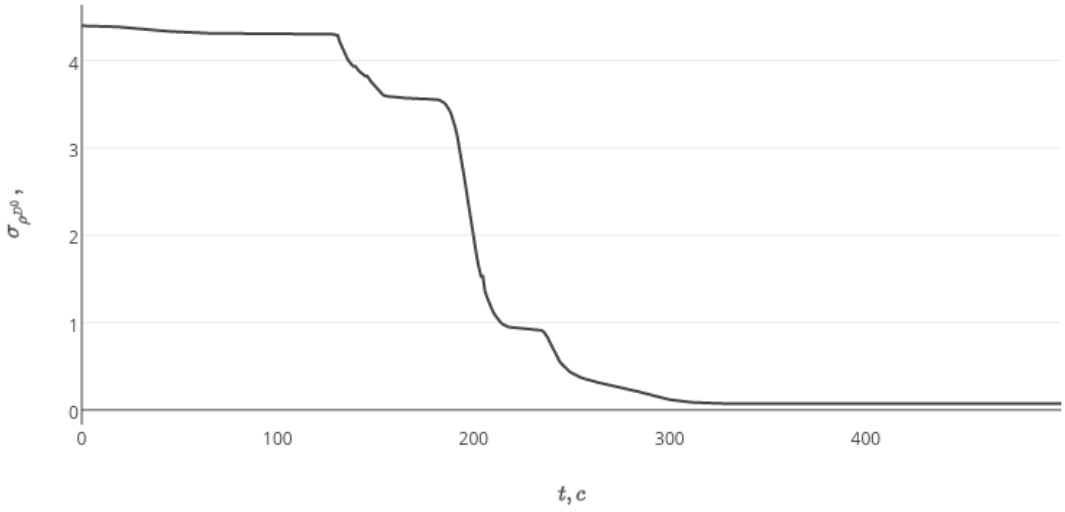

Рисунок 3.11: Зависимость СО ошибки оценки систематической погрешности определения дальности от времени для траектории «Зигзаг»

Результаты ковариационного анализа позволяют рекомендовать использование корректируемой БИНС для навигации АПА с приемлемой точностью.

3.2 Моделирование алгоритма навигации подводного робота с привлечением реальных данных

Моделирование проведено на основе одного из примеров экспериментальных траекторий, приведенных выше. Именно, рассмотрен случай, когда АПА движется по прямой, а АВА (маяк ГАНС) совершает движе-

ние по зигзагу на поверхности воды. В качестве координат маяка ГАНС взяты реальные данные, зарегистрированные в эксперименте.

Движение АПА по прямой имитировалось алгоритмически, как движение на постоянной глубине с постоянными модулем относительной скорости и курсом. Все параметры движения материальной точки и приборного трехгранника БИНС в этом случае связаны простыми соотношениями.

Полученные таким образом параметры траектории использовались, с одной стороны, в качестве эталонной информации для оценки погрешностей алгоритма навигации. С другой стороны, на основе этих параметров формировались входные данные алгоритма — первичная информации БИНС и данные источников дополнительной информации с соответствующими погрешностями.

Для моделирования погрешностей первичной информации БИНС привлекались реальные данные – записи показаний датчиков БИНС в статическом положении. Из показаний вычитались полезные сигналы, и таким образом при моделировании использовались реализации погрешностей ДУС и ньютонометров, полученные экспериментально.

Погрешности датчиков дополнительной информации задавались в виде систематической части (константы) и шума, сгенерированного численно.

Погрешности датчиков первичной информации получены на основе данных датчиков БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов и микромеханических ньютонометров. Графики погрешностей представлены на Рисунках 3.12 - 3.13.

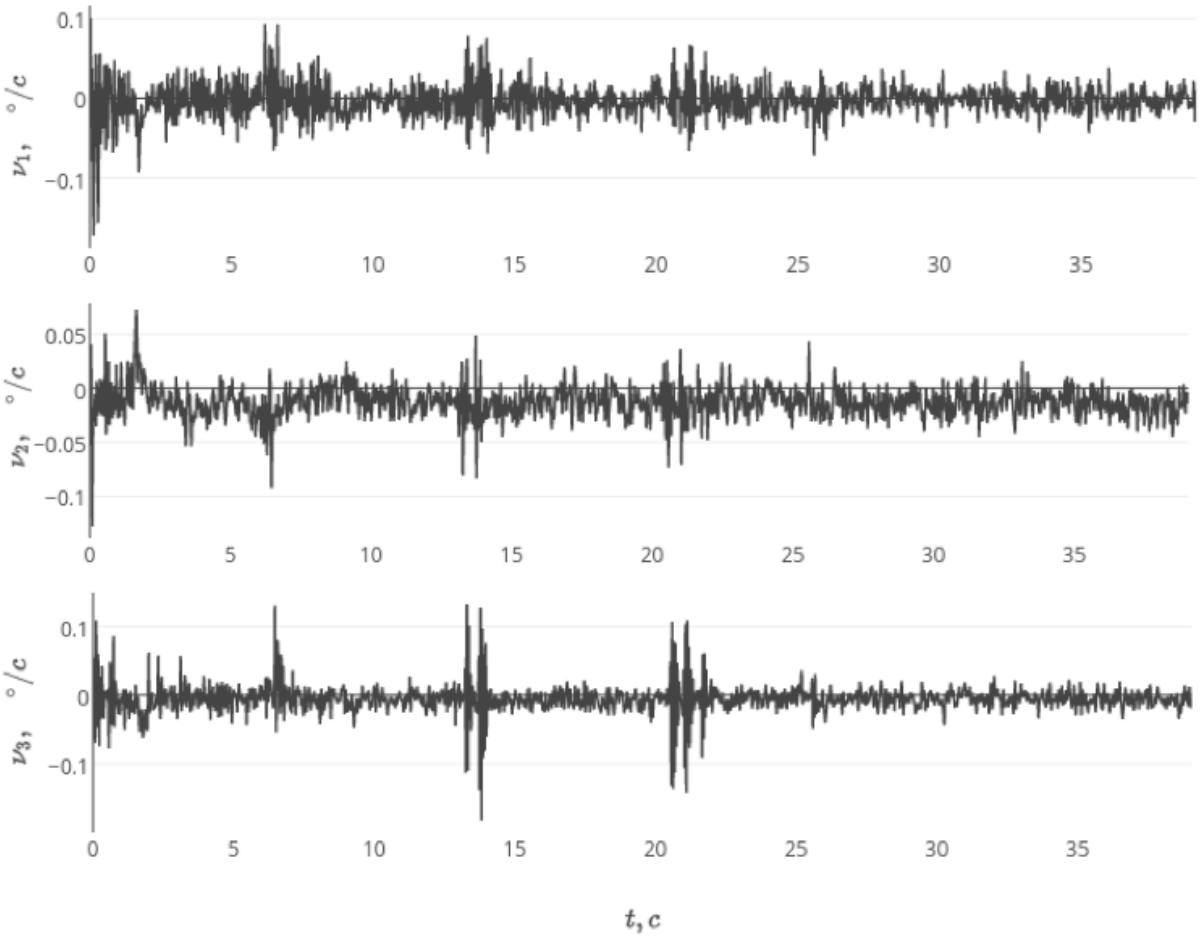

Рисунок 3.12: Погрешности ДУС

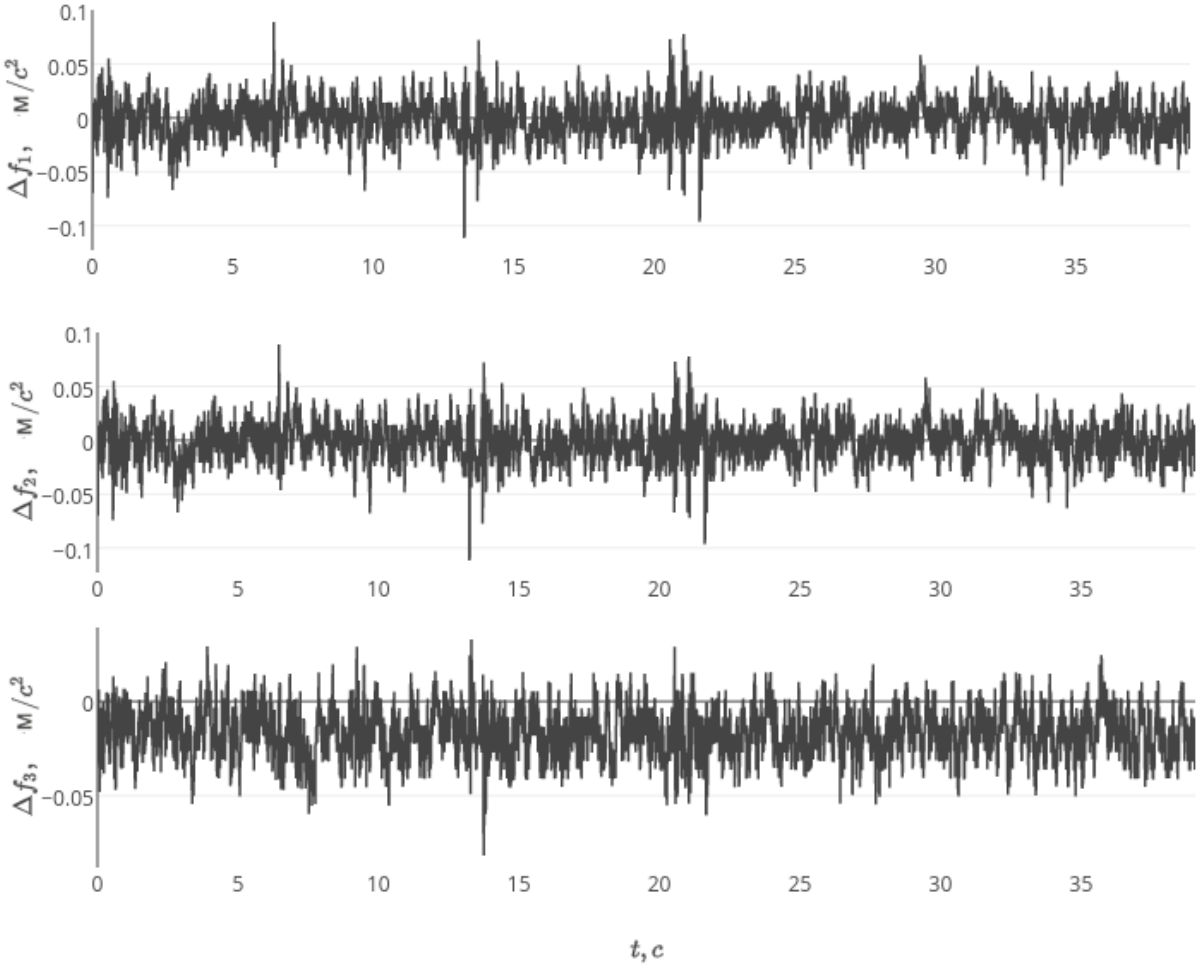

Рисунок 3.13: Погрешности ньютонометров

Погрешность лага задавалась в виде суммы двух составляющих — систематической, пропорциональной измеряемому сигналу с коэффициентом 0.01 (1%) и шумовой с СО — 0.01 м/сек. Погрешность ГАНС в определении дальности задавалась также в виде систематической на уровне 5 м и шумовой с СО — 1 м.

Схема моделирования представлена на рисунке 3.14.

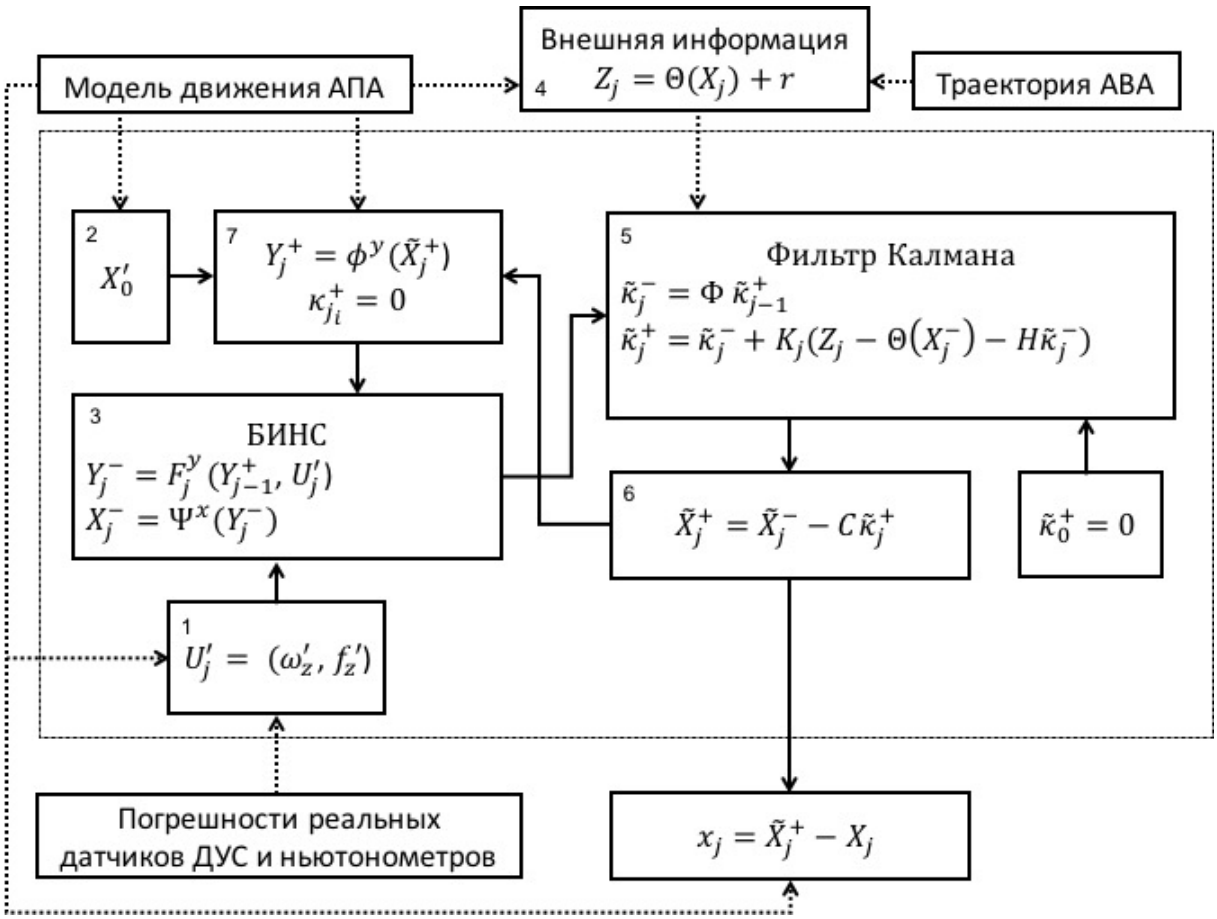

Рисунок 3.14: Схема моделирования

Оценки координат, полученные на выходе алгоритма, сравнивались с эталонными параметрами. Разности координат, определенных алгоритмом, с эталонными параметрами представлены на Рисунке 3.15. Статистика погрешностей приведена в таблице 3.1.

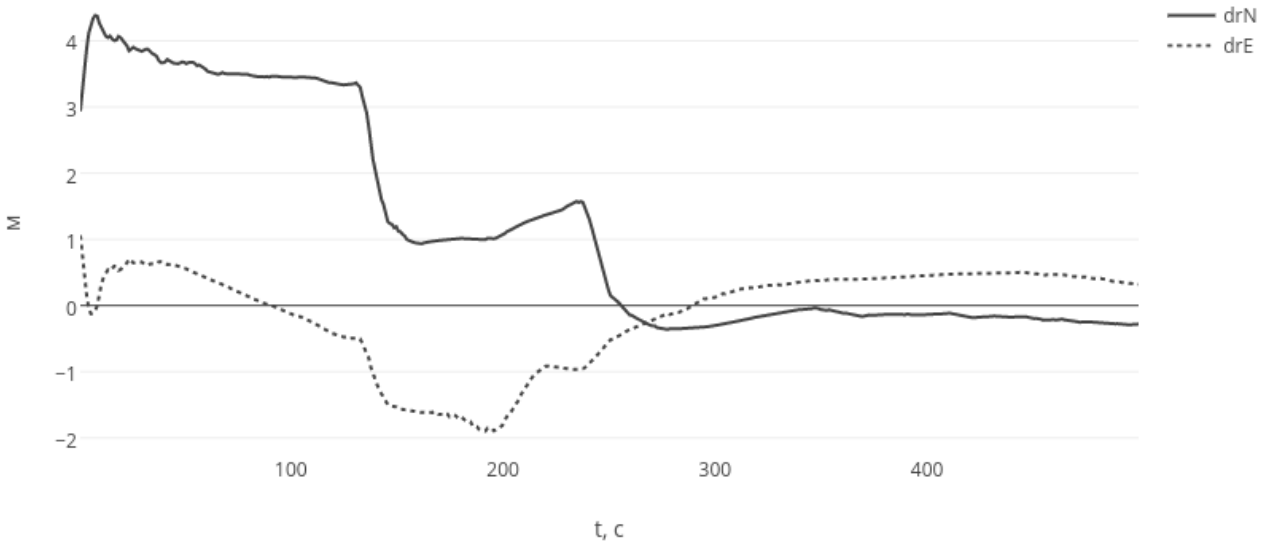

Рисунок 3.15: Погрешность определения координат

	Mean	St. Dev.	Min	Median	Max
Δr_N, м	1,15836	1,6087	-0,362	0,1935	4,383
Δr_E, м	-0,12123	0,75381	-1,898	0,258	1,062

Таблица 3.1: Статистика погрешностей

3.3 Выводы

Результаты моделирования подтверждают работоспособность алгоритма, согласуются с результатами ковариационного анализа, показывают точность навигации на уровне первых метров.

Итак, ковариационный анализ и моделирование показали высокую точность навигации АПА при использовании корректируемой БИНС. В первую очередь, повышение точности достигается за счет повышения точности оценки кинематической ошибки по сравнению с другими схемами.

Глава 4

Метод повышения точности навигационной системы подводного аппарата путем специального режима движения перед погружением

В главе 3 ковариационный анализ точности задачи коррекции БИНС показал, что ошибки определения координат в конце интервала движения (в смысле СО) более чем в два раза меньше начального состояния (1.5 м по сравнению с 3 м). Переходный процесс связан с промежуточными процессами в оценках инструментальных погрешностей БИНС.

Следует сказать, что стендовая калибровка БИНС не решает полностью проблемы оценки параметров модели инструментальных погрешностей БИНС данного класса, так как у датчиков (ДУС и ньютонометров)

имеются погрешности нулей, меняющиеся от запуска к запуску (т.е. индивидуальные в каждом запуске).

4.1 Анализ возможностей калибровки навигационной системы на поворотном устройстве

Была проведена проверка возможности калибровки БИНС при помощи поворотного устройства. Очевидно, единственный тип движения — это вращение аппарата вокруг продольной оси. Параметры движения выбраны из здравого смысла и из опыта калибровки БИНС на специализированных стендах [7].

Калибровка состояла из следующих циклов, каждый из которых должен длиться в течение $t = 900$ секунд:

1. Неподвижное положение в вертикальной плоскости;

2. Вращение аппарата в горизонтальной плоскости вокруг его продольной оси с курсом $\psi = 0°$ по часовой стрелке со скоростью $10°$/час;

3. Вращение в горизонтальной плоскости вокруг продольной оси с курсом $\psi = 90°$ против часовой стрелки со скоростью $10°$/час.

Задача сводится к оценке вектора состояния следующей системы:

$$
\begin{aligned}
&\dot{\beta}_1 = \omega_3\beta_2 - \omega_2\beta_3 + \nu_1,\\
&\dot{\beta}_2 = -\omega_3\beta_1 + \omega_1\beta_3 + \nu_2,\\
&\dot{\beta}_3 = \omega_2\beta_1 - \omega_1\beta_2 + \nu_3,\\
&\nu_x = (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T = L_{z^x}\nu_z,\\
&\Delta f_x = (\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3)^T = L_{z^x}\Delta f_z,\\
&\nu_z = \nu_z^0 + \nu_z^s,\\
&\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Delta f_z^s,\\
&\Delta\dot{\nu}^0{}_z = 0,\\
&\Delta\dot{f}^0{}_z = 0,
\end{aligned}
\tag{4.1}
$$

при помощи измерений:

$$
z = f'_{z^x} - f_x = \hat{\beta}(0, 0, g)^T + L_{z^x}\Delta f_z.
$$

Вектор состояния системы имеет вид:

$$
\chi = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \nu^0{}_{z1}, \nu^0{}_{z2}, \nu^0{}_{z3}, \Delta f^0{}_{z1}, \Delta f^0{}_{z2}, \Delta f^0{}_{z3})^T.
$$

Результаты ковариационного анализа приводятся на графиках 4.1, 4.2, на которых показаны СО ошибки оценки погрешности нулей ньютонометров и ДУС.

Постоянная ошибка продольного ньютонометра не оценивается. В силу ограниченности калибровка такого вида становится ненужной при условии, что используется специальный режим движения АПА перед погружением. Разработке такого режима посвящен следующий раздел.

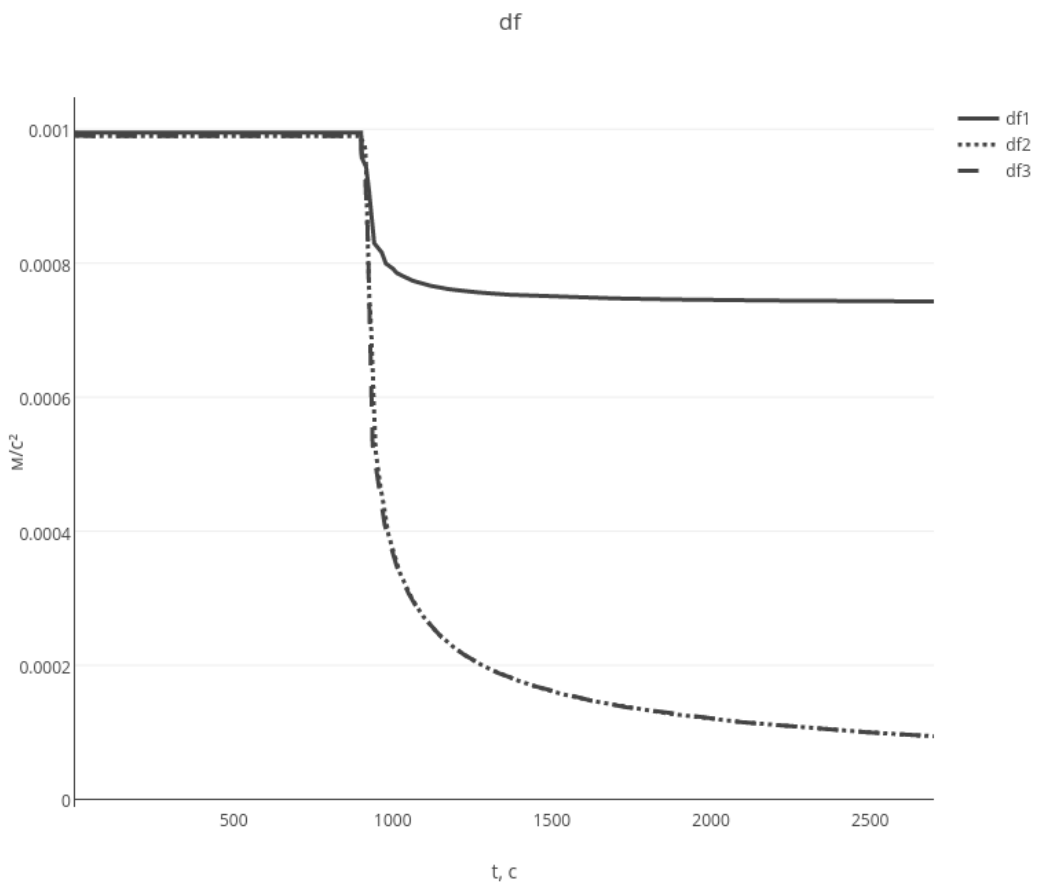

Рисунок 4.1: СО ошибки оценки погрешности нулей ньютонометров

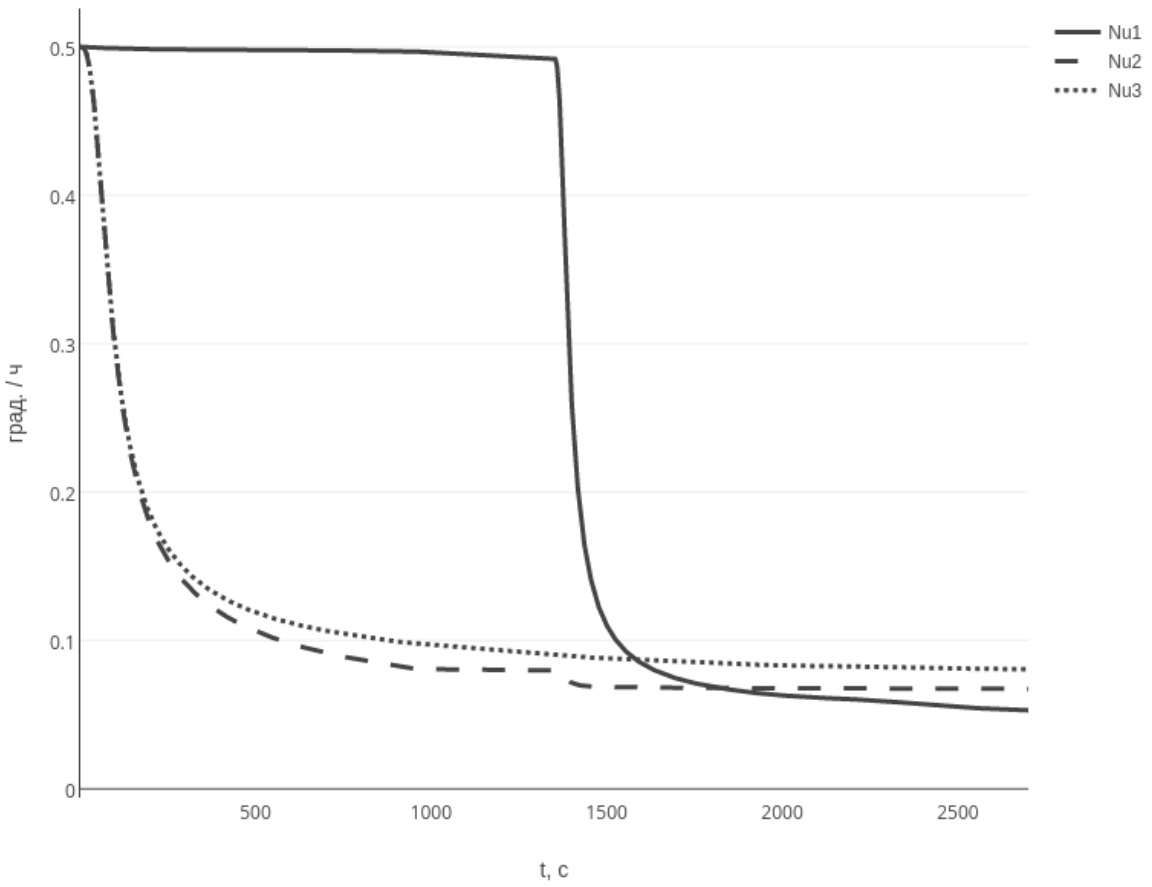

Рисунок 4.2: СО ошибки оценки погрешности нулей ДУС

4.2 Калибровочный режим движения АПА перед погружением

Попытки разработки способа и устройства для калибровки БИНС, установленной на АПА, в каждом запуске не приводят к успеху из-за конструктивных особенностей АПА.

Предлагается следующий режим калибровки путем организации специального движения АПА перед погружением (Рисунок 4.3):

1. Перед погружением АПА добавляется движение его над водой по траектории, близкой к программному движению под водой. При этом работает приемник спутниковой навигации на борту АПА, и информация от него используется для коррекции БИНС.

2. После погружения алгоритм коррекции продолжает работать с использованием корректирующей информации от ГАНС и лага, как описывалось выше.

4.3 Постановка задачи

Так же как и в прошлой главе ставится задача оценки вектора состояния κ (2.19) при помощи внешней информации. В качестве такой информации привлекаются позиционная и скоростная информация, предоставляемая приемником сигналов спутниковой навигационной системы.

Вектор состояния κ состоит из следующих компонент:

$$\kappa = (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3,$$
$$\nu_{z1}, \nu_{z2}, \nu_{z3}, \Delta f^0_{z\,1}, \Delta f^0_{z\,2}, \Delta f^0_{z\,3}, \rho^{D^0}, k^V)^T.$$

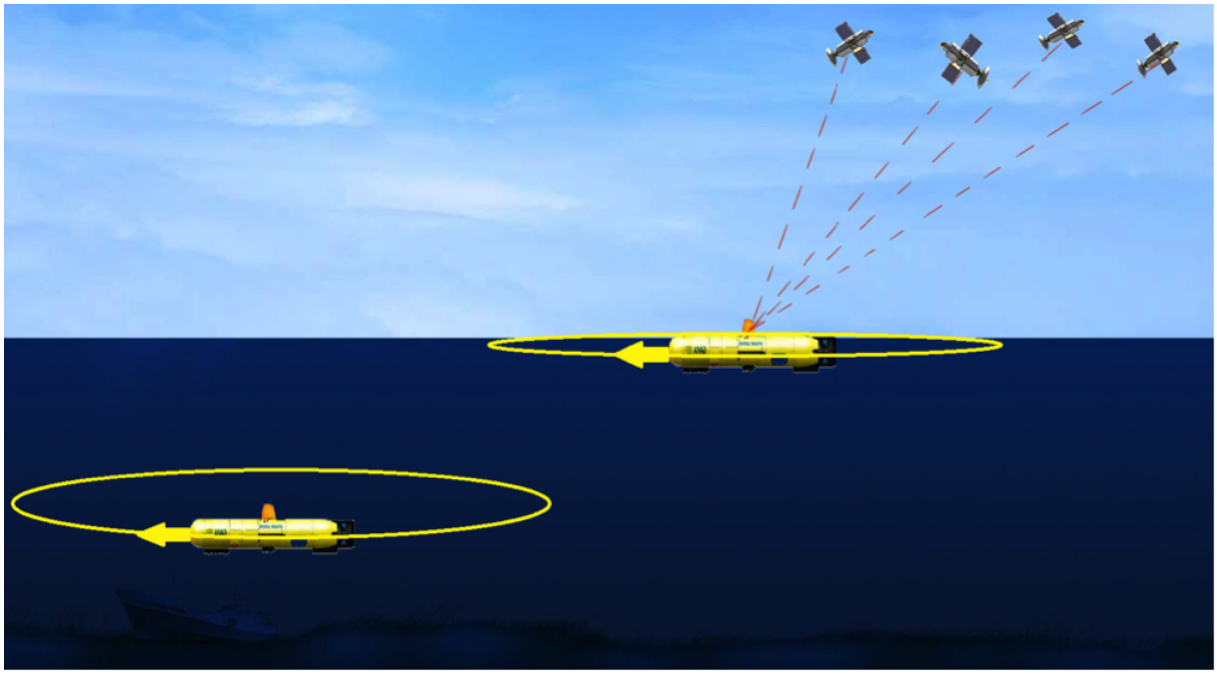

Рисунок 4.3: Калибровочный режим перед погружением

Вектор измерений z^{pos}, z^{vel} имеет вид:

$$
\begin{aligned}
{z_1}^{pos} &= \Delta y_1 + \rho^s_{pos_1}, \\
{z_2}^{pos} &= \Delta y_2 + \rho^s_{pos_2}, \\
{z_1}^{vel} &= \delta V_1 + V_2 \beta_3 + \rho^s_{vel1}, \\
{z_2}^{vel} &= \delta V_2 - V_1 \beta_3 + \rho^s_{vel2},
\end{aligned}
\tag{4.2}
$$

где Δy_1, Δy_2 — полные ошибки местоположения; δV_1, δV_2 — динамические ошибки определения относительной скорости; $\rho^s_{pos_1}$, $\rho^s_{pos_2}$ — высокочастотные погрешности позиционной информации от СНС типа белого шума, ρ^s_{vel1}, ρ^s_{vel2} — высокочастотные погрешности скоростной информации от СНС типа белого шума.

4.4 Результаты ковариационного анализа

Эффективность предложенного режима иллюстрируется результатами ковариационного анализа. Аналогично главе 3 исследуются два типа движения — по траекториям «Зигзаг» (Рисунок 3.1) и «Квадрат» (Рисунок 3.2).

На графиках 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 представлены зависимости СО ошибки оценки определения координат с использованием калибровочного режима перед погружением и без него.

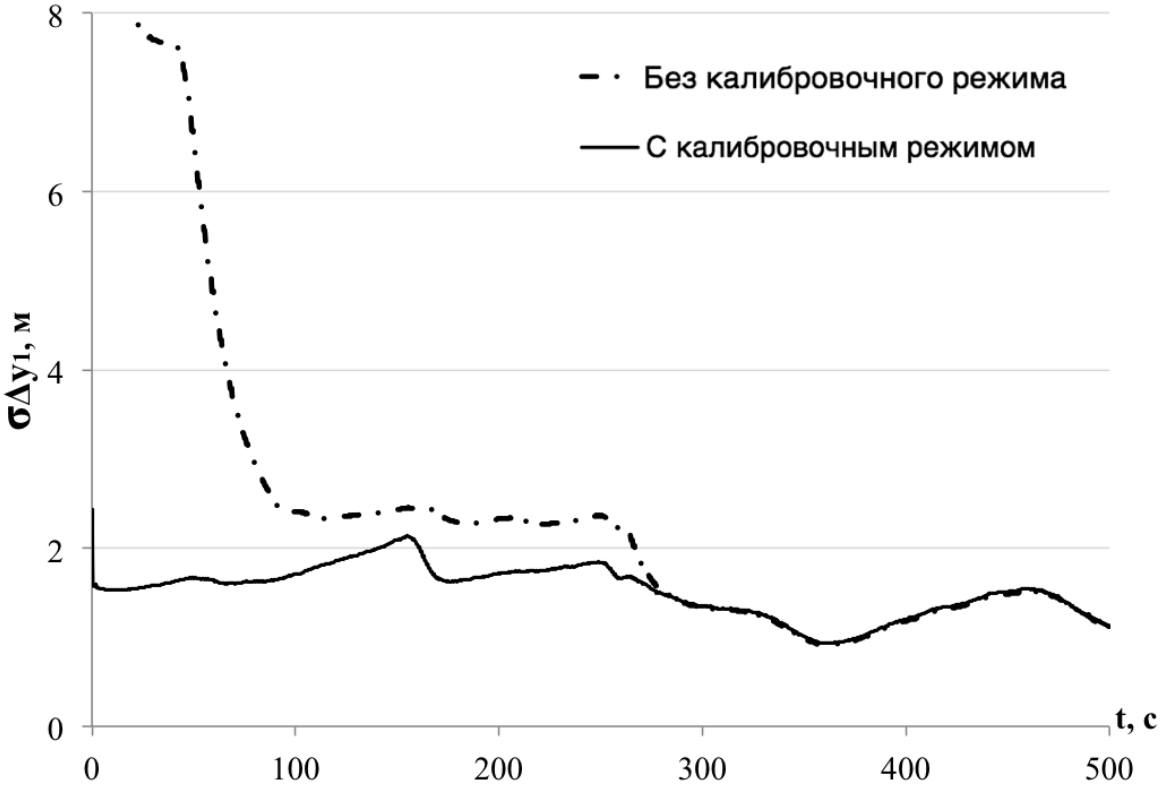

Рисунок 4.4: Сравнение СО ошибки оценки первой координаты от времени для траектории «Зигзаг»

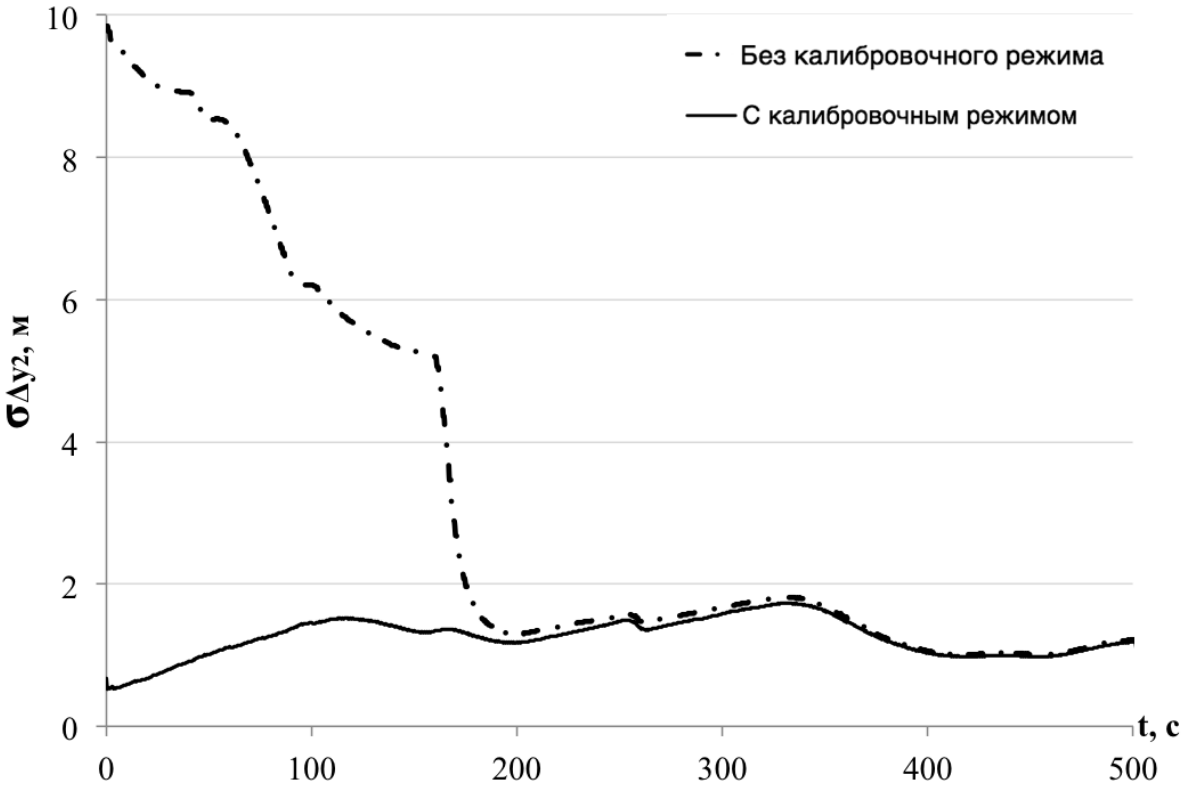

Рисунок 4.5: Сравнение СО ошибки оценки второй координаты от времени для траектории «Зигзаг»

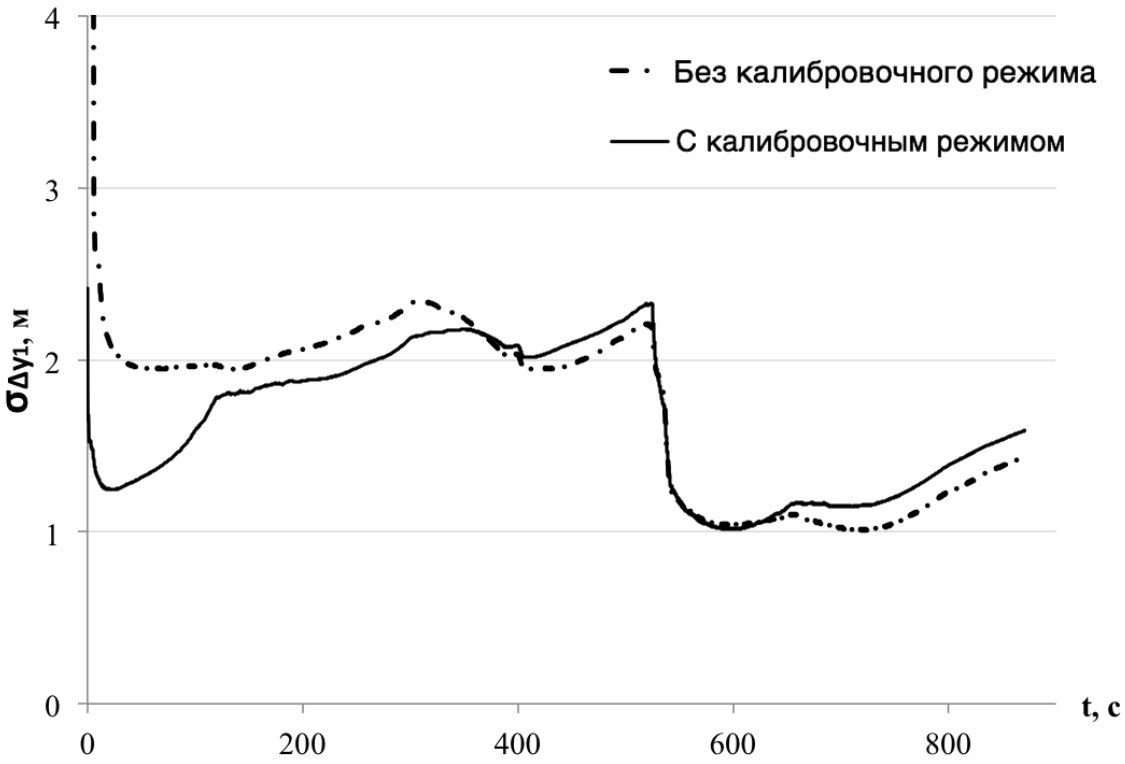

Рисунок 4.6: Сравнение СО ошибки оценки первой координаты от времени для траектории «Квадрат»

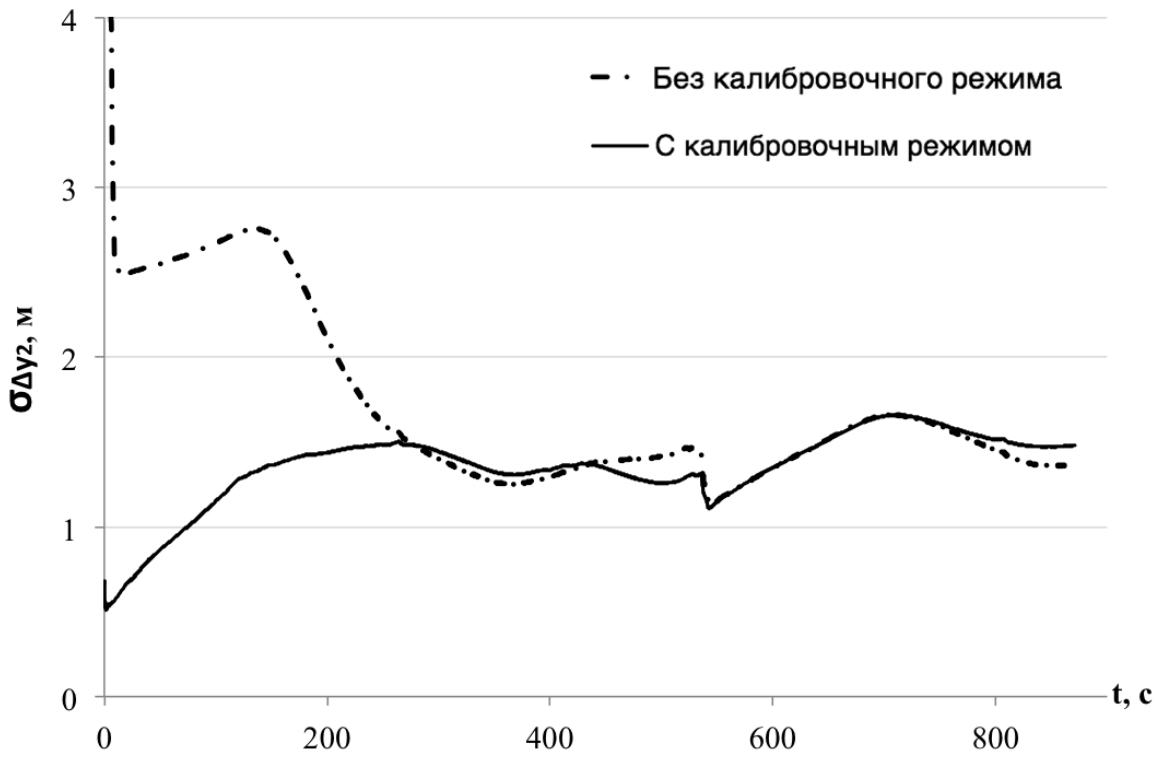

Рисунок 4.7: Сравнение СО ошибки оценки второй координаты от времени для траектории «Квадрат»

4.5 Выводы

Значения СО ошибок оценок координат при использовании алгоритма калибровочного режима в несколько раз меньше аналогичных значений, полученных без использования алгоритма на первых этапах движения аппарата. Калибровочный режим перед погружением, таким образом, может использоваться для навигации в реальном времени с целью получения более точных оценок с самого начала движения АПА.

Глава 5

Оценивание погрешности масштабного коэффициента гидроакустической навигационной системы

Информация о дальности до маяка поступает от гидроакустической системы навигации аппарата. Она определяется на основе обработки амплитудно-фазовой информации, при этом используется алгоритм вычисления расстояния по измеренному времени распространения сигнала. Основным фактором, определяющим особенности распространения звука в море, является его неоднородность по всем параметрам, влияющим на скорость. Известно, что при использовании ГАНС большое значение для точности определения дальности является точность используемого масштабного коэффициента — эффективной скорости звука, которая может меняться в зависимости от плотности водной среды. Иногда преду-

сматриваются предварительные работы по определению значения эффективной скорости звука. Подробно проблема описывается в [32].

Если добавить масштабный коэффициент в вектор ошибок БИНС, то можно получить его оценку, наряду с другими компонентами.

5.1 Постановка задачи

Обозначим через k^D погрешность масштабного коэффициента измерителя дальности. Корректирующее измерение будет иметь следующий вид: :

$$z^{D'} = d^T \Delta y + \rho^D + k^D \rho^*,$$

где $\rho^* = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} {y_i}^{M^2}}$ — расстояние от аппарата до маяка.

Остальные измерения остаются без изменений (2.18) и вектор измерений имеет вид $z = (z^{D'}, z^H, z_1^V, z_2^V)^T$.

Вектор состояния уравнений ошибок, включая масштабный коэффициент:

$$\kappa = (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3,$$
$$\nu_{z1}, \nu_{z2}, \nu_{z3}, \Delta f^0_{z\,1}, \Delta f^0_{z\,2}, \Delta f^0_{z\,3}, \rho^{D^0}, k^V, k^D)^T.$$

Задача сводится к построению оценки вектора κ при помощи вектора измерения z.

5.2 Результаты ковариационного анализа

На графиках 5.1, 5.2 представлены зависимости СО оценки масштабного коэффициента от времени. Качество оценивания параметра погреш-

ности масштабного коэффициента измерителя дальности исследовано при помощи ковариационного анализа. При моделировании начальные значения для СО погрешности масштабного коэффициента было выбрано на уровне 5%, что соответствует реальности. Остальные числовые параметры — те же, что и ранее (см. 3.1, 3.2). Оценка производилась на тех же, что и ранее опорных траекториях.

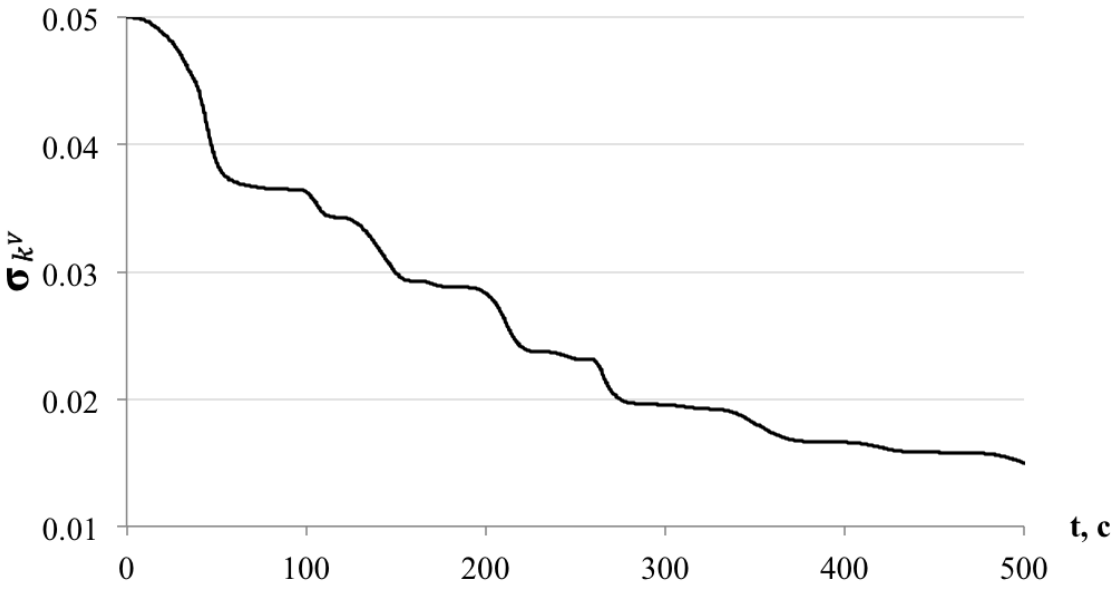

Рисунок 5.1: Зависимость СО оценки масштабного коэффициента от времени для траектории «Зигзаг»

Из графиков следует, что ошибка оценки погрешности масштабного коэффициента (СО) уменьшилась почти в 5 раз. Следует обратить внимание, что такой простой способ освобождает от необходимости проведения обычно осуществляемых специальных работ по определению эффективной скорости звука. И это обстоятельство оправдывает выделение задачи в отдельный раздел.

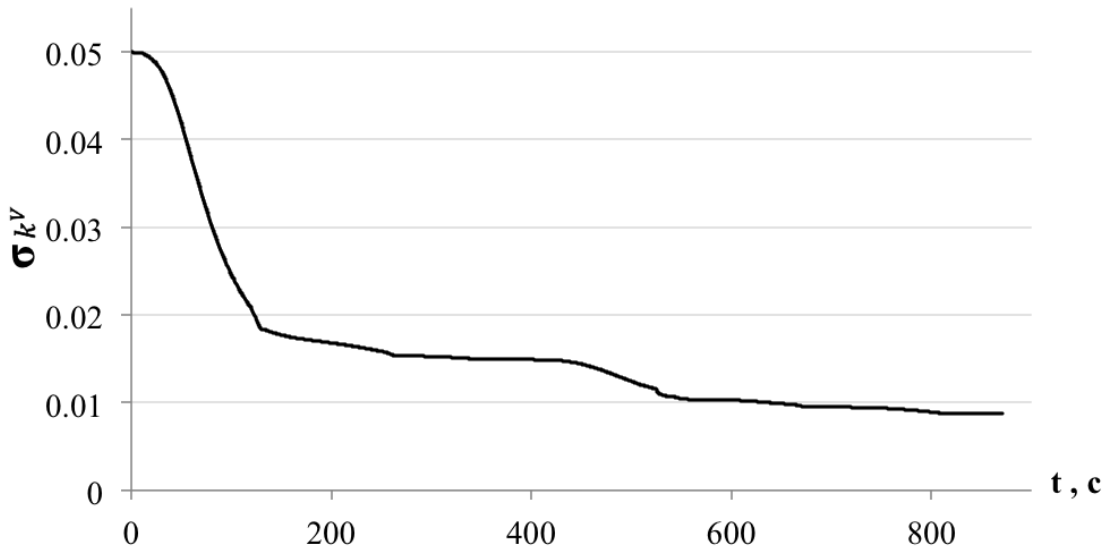

Рисунок 5.2: Зависимость СО оценки масштабного коэффициента от времени для траектории «Квадрат»

5.3 Выводы

Ковариационный анализ показал, что при таком подходе — включении погрешности масштабного коэффициента ГАНС в вектор оцениваемых параметров — точность определения координат не ухудшается, а ошибка масштабного коэффициента хорошо оценивается.

При этом предлагается следующая циклограмма работы навигационной системы АПА:

- Специальный надводный калибровочный режим, при котором, в соответствии с результатами главы 4, аппарат движется по поверхности воды с включенным приемником СНС.

- Погружение и движение в течение 5 минут для определения погрешности масштабного коэффициента ГАНС.

- Выполнение миссии. Движение по программной траектории.

Заключение

В работе получены следующие результаты:

- Определена конфигурация навигационной системы АПА, в которой в качестве основной системы принимается БИНС среднего класса точности, а информация остальных датчиков используется как корректирующая. В рамках принятой конфигурации выбраны целесообразные формы модельных уравнений и уравнений ошибок БИНС, определен набор инструментальных погрешностей и априорные числовые значения с ними связанных параметров. Выведены уравнения измерений, доставляющих корректирующую информацию. Описана задача коррекции БИНС в варианте введения обратных связей.

- При помощи ковариационного анализа показано, что задача навигации АПА на основе корректируемой БИНС может быть решена с достаточно высокой точностью. В частности, определение координат осуществляется с точностью до первых метров. По сравнению с существующими системами иной конфигурации эта точность оказывается выше в 3–5 раз. Такое улучшение связано с тем, что в системах с БИНС оценивается кинематическая ошибка БИНС (ошибка определения ориентации).

- Предложен калибровочный режим навигационной системы АПА, состоящий в организации специального движения его перед погружением, и обоснована целесообразность такого режима. Именно, путем ковариационного анализа показано, что при использовании алгоритма калибровочного режима СО ошибки оценки координат в несколько раз меньше аналогичных значений, полученных без использования алгоритма на первых этапах движения аппарата. Калибровочный режим перед погружением, таким образом, может использоваться для навигации в реальном времени с целью получения более точных оценок с самого начала движения АПА.

- Предложен способ оценки погрешности гидроакустической навигационной системы, связанной с точностью определения эффективной скорости звука в воде, позволяющий сократить количество подготовительных работ.

Итогом проведенного исследования служит то, что навигационная система АПА предложенной структуры может быть рекомендована для реализации.

Литература

1. Панев А.А., Вавилова Н.Б., Голован А.А. Задача навигации внутритрубного диагностического снаряда // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика и механика. 2011. № 1. С. 53–56.

2. А.А. Голован, И.В. Никитин. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 1 // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика и механика. 2015. № 2. С. 69–72.

3. А.А. Голован, И.В. Никитин. Задачи интеграции БИНС и одометра с точки зрения механики корректируемых инерциальных навигационных систем. Часть 2 // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика и механика. 2015. № 4. С. 68–72.

4. Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. Сферический вейвлет-анализ аэрогравиметрических данных // Геофизические исследования. 2012. № 13(2).

5. Ю.В. Болотин, А.А. Голован. О методах инерциальной гравиметрии // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика и механика. 2013. № 5.

6. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации. 3-е издание, испр. и. доп. МАКС Пресс Москва, 2011. с. 136.

7. Голован А. А., Парусников Н. А. Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. 2-е издание, испр. и доп. МАКС Пресс Москва, 2012. с. 172.

8. Парусников Н.А. Задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы на стенде // Известия РАН. Механика твердого тела. 2009. № 4.

9. Вавилова Н. Б., Парусников Н. А., Сазонов И. Ю. Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов // Современные проблемы математики и механики. 2009. Т. 1. С. 212–223.

10. Парусников Н. А., Тихомиров В. В., Трубников С. А. Определение инструментальных погрешностей инерциальной навигационной системы на неподвижном основании // Фундаментальная и прикладная математика. М., 2005. Т. 11, № 7. С. 159–166.

11. Вавилова Н. Б., Голован А. А., Парусников Н. А. К вопросу об информационно эквивалентных схемах в корректируемых инерциальных навигационных системах. Механика твердого тела // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2008. № 3. С. 90–101.

12. Козлов А.В., Парусников Н.А. Автономное определение взаимной ориентации приборных трехгранников двух бескарданных инерциальных навигационных систем во время движения // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика и механика. 2010. № 1.

13. Александров В. В., Парусников Н. А. Развитие теории навигации и А. Ю. Ишлинский // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. М., 2013. № 5. С. 51–53.

14. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации (автономные системы). М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966.

15. Андреев В. Д. Теория инерциальной навигации (корректируемые системы). М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967.

16. Обзор развития теории гироскопических и инерциальных навигационных систем / В.Д. Андреев, И.Д. Блюмин, Е.А. Девянин [и др.] // Развитие механики гироскопических и инерциальных систем. М., 1973. с. 33.

17. Парусников Н. А., Морозов В. М. Развитие представлений теории инерциальной навигации (корректируемые системы) // Избранные труды. Т. 2 из *Механика.* Издательство Московского университета г. Москва, 2010. С. 218–237.

18. Парусников Н. А., Морозов В. М., Борзов В. И. Задача коррекции в инерциальной навигации. изд-во Моск. ун-та Москва, 1982. с. 176.

19. Голован А. А., Парусников Н. А. О связи стохастической меры оцениваемости с сингулярными разложениями матриц N2 // Автоматика и телемеханика. 1998. № 2.

20. Голован А. А., Парусников Н. А. Стохастический анализ точности редуцированных моделей задач калмановской фильтрации // Научные труды МЭИ N655. Математическое моделирование динамики управляемых систем машин и механизмов. N655. Издательство МЭИ Москва, 1991.

21. Ориентация и навигация подвижных объектов. Современные информационные технологии / Николай Животов, Борис Алёшин, Александр Афонин [и др.]. Litres, 2016.

22. Savage Paul G. Introduction to strapdown inertial navigation systems. Strapdown Associates, 2010.

23. Grewal Mohinder S, Weill Lawrence R, Andrews Angus P. Global positioning systems, inertial navigation, and integration. John Wiley & Sons, 2007.

24. Grewal Mohinder S., Andrews Angus P. Kalman filtering : theory and practice using MATLAB. New York, Chicester, Weinheim: Wiley, 2001.

25. Парусников Н. А., Морозов В.М., Борзов В.И. Задача коррекции в инерциальной навигации. изд-во Моск. ун-та, Москва, 1982. с. 176.

26. Farrell B.Г. Jay A. Aided Navigation: GPS with High Rate Sensors // McGraw-Hill Professional. 2008.

27. Степанов О.А., Пешехонов. Tradeos in the Implementation of Integrated GPS Inertial Systems // Спб: ГНЦ ЦНИИ "Электроприбор". 2001.

28. Lipman J.S. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Proc. of the Instit. of Navigation GPS-92 Tech. Meeting. The Institute of Navigation, Alexandria, VA. 1992.

29. Kalman R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of basic Engineering. 1960. Т. 82, № 1. С. 35–45.

30. Калман Р.Е., Фарб П., Арбиб М. Очерки по математической теории систем. М.:Мир, 2015.

31. Варавва В. Г., Голован А. А., Парусников Н. А. О стохастической мере оцениваемости // Коррекция в навигационных системах и системах ориентации искусственных спутников Земли. Издательство МГУ Москва, 1986. С. 4–9.

32. Агеев М.Д. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. Москва, Наука, 2005. с. 400.

33. Гидроакустические навигационные средства / В.И. Бородин, Смирнов, Толстякова Н.А. Г.Е. [и др.]. Л.:Судостроение, 1983. с. 262.

34. Милн П.Х. Гидроакустические системы позиционирования. Л.:Судостроение, 1981. с. 248.

35. Maki T. AUV Navigation with a Single Seafloor Station Based on Mutual Orientation Measurements / T. Maki, T. Matsuda, T. Sakamaki, T. Ura // Proceedings of Symposium on Underwater Technology 2011 and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies. Tokyo, Japan, April 5-8, 2011.

36. Lurton X., Millard N. The feasibility of a very-long baseline acoustic positioning system for AUV. Proc. of Ocean-94, Brest, Vol. 3, 1994. P. 403–408.

37. Thomson D., Elson S. New generation acoustic positioning systems. Proc. of Ocean-2002, 1994. P. 1312–1318.

38. Curcio J. Experiments in Moving Baseline Navigation using Autonomous Surface Craft. Proc. of OCEANS'05 MTS/IEEE. Washington, USA, 2005.

39. Santos N. Navigation of an Autonomous Underwater Vehicle in a Mobile Network. Proc. of OCEANS'08 MTS/IEEE. Quebec, Canada, 2008.

40. Касаткин Б.А., Косарев Б.А. Физические основы акустической дальности // Вестник ДВО РАН. 1998. № 3.

41. Webster S. E. Advances in Decentralized Single-Beacon Acoustic Navigation for Underwater Vehicles: Theory and Simulation. Proceedings of the IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles Conference, Monterey, CA, USA, 2010.

42. Scherbatyuk A. Ph., Dubrovin F. S. Some Algorithms of AUV Positioning Based on One Moving Beacon // Proceedings of the IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles. April 10 - 12, Porto, Portugal, 2012.

43. Дубровин Ф.С. Разработка методов и алгоритмов одномаяковой навигации автономных необитаемых подводных аппаратов. Диссертация на соиск. уч. ст. кандидата технических наук. Дальневосточный федеральный университет, 2013.

44. Малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций / Ю. В. Ваулин, Ф. С. Дубровин, А. А. Кушнерик [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 6, с. 59-65.

45. Панев А.А. Задача навигации мобильных диагностических комплексов в режиме постобработки. Диссертация на соиск. уч. ст. кандидата физико-математических наук. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 2011.

46. Малогабаритный многофункциональный автономный необитаемый подводный аппарат «МТ-2010» / А.А. Борейко, В.Е. Горнак, С.В. Мальцева [и др.] // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2(12), с. 37-42.