



На правах рукописи

КУРШИН Андрей Владимирович

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ НА ПОДВОДНОМ АППАРАТЕ ДАННЫХ
ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, МАГНИТОМЕТРА И
ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ
ГЛОНАСС**

Специальность: 05.13.01 – «Системный анализ, управление и
обработка информации»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016 год

Работа выполнена в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете).

Научный руководитель: Малышев Вениамин Васильевич,
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, заведующей
кафедрой, Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет).

Официальные оппоненты: Дишель Виктор Давидович,
доктор технических наук, начальник отдела ФГУП
«Научно-производственный центр автоматики и
приборостроения им. академика Н.А.Пилюгина»

Ревнивых Сергей Георгиевич,
кандидат технических наук, директор департамента
развития системы ГЛОНАСС
АО «Информационные спутниковые системы им.
академика М.Ф.Решетнева»

Ведущая организация: Федеральное государственное казенное военно-образовательное учреждение Военно—научный центр ВМФ «Военно-морская академия имени Адмирала Н.Г.Кузнецова Минобороны России».

Защита состоится 22 декабря 2016 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, Москва, ГСП, Волоколамское шоссе, дом 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Автореферат разослан “ ___ ” _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12

к.т.н., доцент

_____ А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшим приоритетом национальной политики России, обозначенным в Морской доктрине России на период до 2020 года, является развитие морской хозяйственной деятельности в Мировом океане. Решение задач по исследованию и изучению природы Мирового океана, поиска и промышленного освоения полезных ископаемых в Мировом океане, промышленного освоения районов Арктического шельфа требуют развития морского транспортного обеспечения, как надводного, так и подводного. Для решения поставленных перед Военно-Морским Флотом Российской Федерации задач также требуется соответствующее обеспечение. Здесь необходимо отметить, что несмотря на оснащение Военно-Морского Флота Российской Федерации современным тактическим ракетно-ядерным оружием, подводные аппараты - торпеды не утратили своего значения. Являясь самым эффективным противолодочным и противокорабельным средством, они состоят на вооружении всех классов надводных кораблей, подводных лодок и морской авиации.

Ключевым фактором эффективного выполнения миссий подводных аппаратов является надежность и точность технических средств навигации. Навигационные средства подводного аппарата предназначены для решения задач, обеспечивающих надежную, высокоточную и достоверную навигационную поддержку движения и выполнения поставленных задач перед подводным аппаратом.

Существенный вклад в создание и развитие методов управления подводными аппаратами внесли: М.Д.Агеев, Е.Н.Пантов, Е.В.Тарасов, А.И.Петербург, В.В.Малышев, В.Т.Бобронников, С.А.Горбатенко, М.Н.Красильщиков А.В. Федоров, Ю.Д.Тычинский, В.П.Махров и др.

В связи с возрастанием сложности и важности решаемых задач подводными аппаратами возрастают и требования к точности его навигации под водой и доведения её до значений, близких к точности определения местоположения с помощью глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС.

Когда объект навигации находится на поверхности воды, решение задачи определения координат обеспечивается с помощью приемников спутниковой навигации. Погружаясь, радиоволны ослабляются водой, и навигация осуществляется с помощью инерциальной навигационной системы (ИНС). Для повышения точности ИНС в ее состав включают блок чувствительных элементов и датчики глубины, а также дополнительно используют магнитометр.

Недостатком ИНС является накопление навигационной ошибки, величина которой зависит как от инструментальных ошибок измерительных датчиков, так и от методов обработки доставляемой информации. Для устранения этого недостатка ИНС необходимо периодически корректировать, вводя корректирующие значения, что возможно с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) при всплытии на поверхности воды.

Таким образом, решение задачи комплексирования данных, полученных от ИНС, включая блок чувствительных элементов и датчики глубины, магнитометра, а также измерений ГНСС, позволит повысить точность и достоверность навигационного обеспечения под водой, что обуславливает актуальность данной задачи. Это позволит повысить эффективность использования подводных аппаратов при проведении различного рода операций.

Необходимо отметить, что применение ИНС для навигации подводных аппаратов является традиционным решением задачи определения местоположения (М.Д.Агеев, Е.Н.Пантов, Е.В.Тарасов). Использование магнитометра для измерения магнитного поля Земли в навигации подводных аппаратов встречается достаточно редко (А.И.Петербург, В.В.Малышев, В.Т.Бобронников, В.В.Аверкиев). Вопрос высокоточной навигации подводного аппарата по сигналам ГНСС в условиях кратковременного всплытия на поверхность воды является новым. И здесь надо решить мало разработанную задачу по уточнению эфемеридно-временной информации ГНСС в реальном времени и разработать предложения по формату передаваемой информации для уменьшения времени сеанса дифференциальной навигации.

Цель работы. Целью диссертационной работы является повышение точности навигации подводного аппарата на основе разработки технологии комплексирования на подводном аппарате данных, полученных от инерциальной навигационной системы, включая блок чувствительных элементов и датчики глубины, а также магнитометра, с данными глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС. Данная технология включает в себя алгоритмы и разработанное на их основе программное обеспечение.

Назначение этой технологии – используя измерения блока чувствительных элементов, датчика глубины, данных ГНСС, магнитометра, получить оценку вектора положения подводного аппарата, точность которой будет выше, нежели при использовании только измерений блока чувствительных элементов и датчика глубины, реализуемой в традиционной ИНС.

Использование разнородных данных требует определить способы и методы их обработки. Таким образом, постановка задачи разработки технологии комплексирования на подводном аппарате данных, полученных от инерциальной навигационной системы, магнитометра, ГНСС ГЛОНАСС заключается в определении этапов и алгоритмов применения доступных измерений при навигации подводного аппарата. На первом этапе – первоначальная выставка инерциальной навигационной системы подводного аппарата. На втором этапе – запуск подводного аппарата и после отхода от носителя, совершение подводным аппаратом калибровочного маневра, набор массивов измерений трехкомпонентного магнитометра и показаний навигационной системы, калибровка магнитометра. На третьем этапе – оценка вектора состояния подводного аппарата с использованием показаний инерциальной навигационной системы и трехкомпонентного магнитометра. На четвертом этапе – кратковременное всплытие, прием измерений от ГНСС и решение навигационной задачи по измерениям ГНСС, уточнение местоположения подводного аппарата, оценка ухода чувствительных элементов ИНС. На пятом этапе – оценка вектора состояния подводного с использованием показаний ИНС, трехкомпонентного магнитометра и данных глобальной спутниковой навигационной системы.

Применение разработанной технологии комплексирования данных от ИНС, магнитометра и ГНСС позволит повысить точность навигации подводного аппарата и, тем самым, повысить эффективность их применения.

Объект исследования. Объектом исследования является технология комплексирования на подводном аппарате данных, полученных от инерциальной навигационной системы, магнитометра, с данными от глобальных навигационных спутниковых систем, а также их алгоритмическая и программная реализация.

Методы исследования. При разработке и реализации технологии комплексирования на подводном аппарате данных, полученных от ИНС, магнитометра и ГНСС используются методы статистические обработки данных, методы оптимальной фильтрации и адаптивные методы обработки информации. При программной реализации математического обеспечения технологии комплексирования на подводном аппарате используются язык программирования C/C++, среда программирования MatLab, мультизадачность операционных систем Windows, Linux, а также средства обеспечения доступа в Интернет (для формирования коррекций к измерениям ГНСС).

Научная новизна. Новыми научными результатами в диссертации являются:

1. Методическое и математическое обеспечение решения задачи комплексирования измерений магнитометра с ИНС.
2. Метод калибровки магнитометра на движущемся подводном аппарате.
3. Методическое и математическое обеспечение решения задачи определения координат подводного аппарата по сигналам ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou) при кратковременном всплытии.
4. Метод повышения обусловленности навигационной задачи подводного аппарата, находящегося на водной поверхности за счет информации о начальных условиях: координаты точки запуска подводного аппарата, а также высоты над земным эллипсоидом.

5. Алгоритмическое и программное обеспечение для решения задачи вычисления уточненной ЭВИ ГНСС в реальном времени с использованием данных от глобальной беззапросной измерительной сети.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием апробированных математических методов и подтверждается применением в реальных условиях и сравнением некоторых результатов с данными, полученными сторонними производителями навигационной аппаратуры.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость работы состоит в решении задачи комплексирования измерений магнитометра с ИНС и обнаружения объектов, обладающих собственным магнитным полем, с использованием магнитометра, а также в разработке метода калибровки магнитометра на движущемся подводном аппарате, метода комплексирования измерений магнитометра с ИНС, установленной на аппарате. Решаемая в диссертации задача разработки технологии комплексирования на подводном аппарате данных, полученных от инерциальной навигационной системы, включая блок чувствительных элементов и датчики глубины, а также магнитометра, с данными глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС, отражает практическую потребность повышения качества навигационного обслуживания подводных аппаратов, обеспечения национальной безопасности и социально-экономического развития Российской Федерации. Результаты работы использованы во ФГУП «ЦНИИмаш», АО «ГНПП «Регион» и АО «Российские космические системы», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на 17-ой международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» (г. Евпатория, Украина, 2012 г.), VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий» (г. Москва, 2013 г.), XVIII международной научной конференции «Системный анализ, управление и

навигация» (г. Евпатория, Украина, 2013 г.), XVIII Макеевский чтениях (г. Екатеринбург, 2013 г.).

Личный вклад и публикации. Все результаты, приведенные в диссертации, получены лично автором. По теме диссертации опубликовано шесть печатных работ, из них три в ведущих рецензируемых научных журналах, определённых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации.

На защиту выносятся:

1. Методическое и математическое обеспечение решения задачи комплексирования измерений магнитометра с ИНС.
2. Метод калибровки магнитометра на движущемся подводном аппарате и метод комплексирования измерений магнитометра с ИНС, установленной на аппарате. Данный метод калибровки ИНС по измерениям магнитометра включает определение ухода углов курса, тангажа и крена, измеренных гироскопом.
3. Методическое и математическое обеспечение решения задачи определения координат подводного аппарата по сигналам ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou) при кратковременном всплытии. Данное обеспечение содержит форматы передачи дифференциальных данных для уменьшения времени навигации подводного аппарата. Дифференциальные поправки включают в себя как быстро меняющиеся данные (коррекция частотно-временных поправок), так и медленно меняющиеся данные (коррекция эфемеридно-временной информации). Также передается информация о целостности данных, в том числе и дифференциальных.
4. Метод повышения обусловленности навигационной задачи подводного аппарата, находящегося на водной поверхности за счет информации о начальных условиях: координаты точки запуска подводного аппарата, а также высоты над земным эллипсоидом.

5. Алгоритмическое и программное обеспечение для решения задачи вычисления уточненной эфемеридно-временной информации ГНСС в реальном времени с использованием данных от глобальной беззапросной измерительной сети.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы из 56 наименований. Общий объем работы составляет 144 страницы, в том числе 36 рисунков и 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертации, определены цели, задачи, объект и методы исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, рассмотрена научная новизна, практическая и теоретическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту, кратко рассмотрено содержание глав диссертации.

В **первой главе** приведены уравнения движения подводного аппарата в различных формах. Данные уравнения используются в дальнейшем при решении задачи навигации подводного аппарата с использованием измерений от инерциальной навигационной системы и магнитометра. Уравнения динамики дополнены различными альтернативными вариантами кинематических уравнений, основанных на углах ориентации, матрице направляющих косинусов и параметрах Родрига-Гамильтона.

Также приведены модели основных воздействий на аппарат: сил тяжести и Архимеда, двигательной установки, гидродинамических сил и моментов, включая силы и моменты от рулей. В отдельном разделе рассмотрена упрощенная модель движения с использованием метода линеаризации и разделения движения на боковое, продольное и вращательное.

Модель движения подводного аппарата реализована в виде программного математического обеспечения (ПМО). Разработанное ПМО моделирует: движение подводного аппарата; показания бортовой навигационной системы; отклонения рулей подводного аппарата.

Приведены результаты моделирования движения подводного аппарата с использованием разработанного ПМО.

Во **второй главе** приводятся математические модели, описывающие работу инерциальной навигационной системы (ИНС). Приведены модели работы следующих датчиков: блока чувствительных элементов и датчиков глубины. Также рассмотрены алгоритмы первичной обработки показаний датчиков, в том числе с учетом систематических погрешностей.

Приведены алгоритмы вторичной обработки измерений, выходом которых являются оценки координат и параметров ориентации подводного аппарата. Рассмотрены традиционные алгоритмы, а также проведен анализ их использования для подводных аппаратов.

На основе приведенных алгоритмов разработано программное математическое обеспечение моделирования работы ИНС подводного аппарата. На рисунке 1 приведена блок-схема программы, моделирующей показания ИНС подводного аппарата с учетом погрешностей чувствительных элементов.

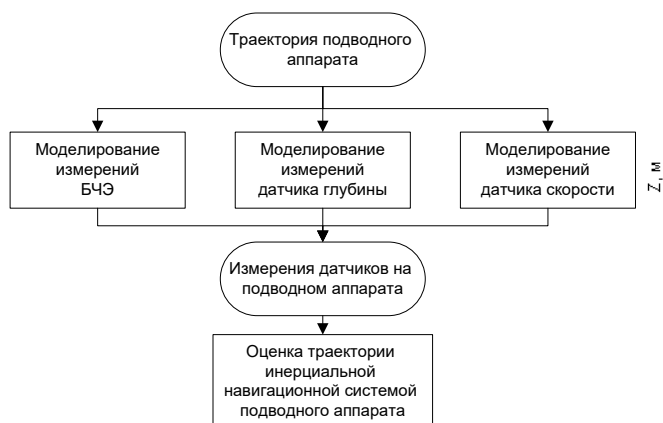


Рисунок 1 - Блок-схема ПМО ИНС подводного аппарата

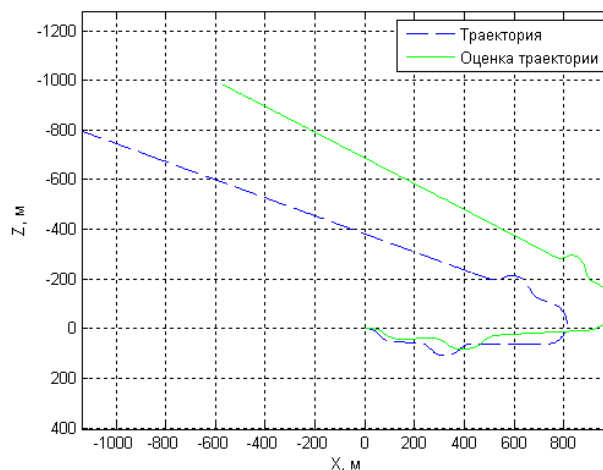


Рисунок 2 - Имитируемая траектория и ее оценка на основе данных ИНС

На рисунке 2 приведены результаты моделирования с использованием разработанного ПМО – имитация движения подводного аппарата в плоскости и вычисление оценки координат подводного аппарата на основе данных ИНС. Сплошная кривая - это имитируемая (истинная) траектория, а пунктирная – ее оценка на основе данных ИНС. На рисунке видно, что в конце траектории ошибка оценки местоположения подводного аппарата составила более 200 метров.

В третьей главе решается задача комплексирования измерений магнитометра с ИНС. Приводится описание метода калибровки магнитометра на движущемся подводном аппарате, метода комплексирования измерений магнитометра с ИНС, установленной на аппарате.

Для решения поставленной задачи предложен метод калибровки магнитометра подводного аппарата, определение собственного магнитного поля подводного аппарата, магнитного поля Земли, а также других калибровочных параметров непосредственно после пуска подводного аппарата. Приведен метод калибровки инерциальной навигационной системы по измерениям магнитометра с определением ухода углов курса, тангажа и крена, измеренных гироскопом.

Разработан метод комплексирования измерений магнитометра с инерциальной навигационной системой, заключающийся в оценке уходов ИНС на основе данных трехкомпонентного магнитометра. На рисунках 3-5 приведены результаты применения метода комплексирования измерений магнитометра с ИНС.

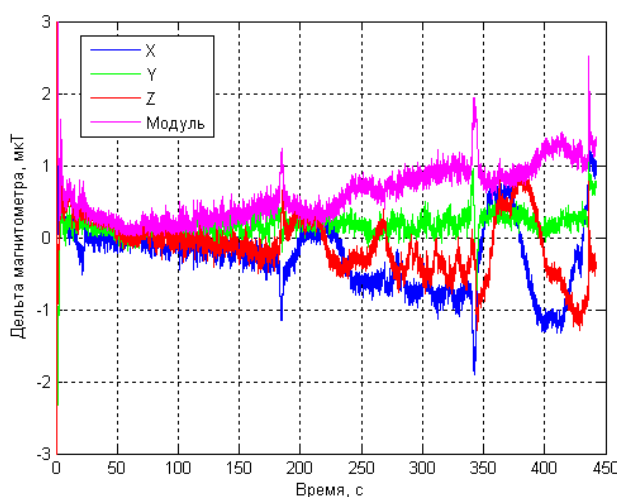


Рисунок 3 - Невязки магнитометра без оценки ухода ИНС

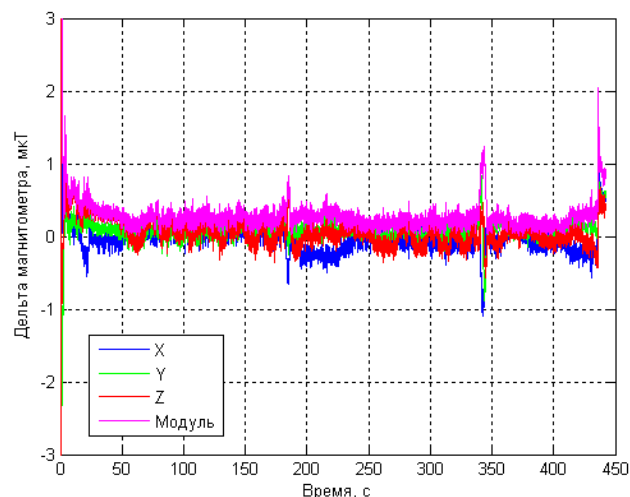


Рисунок 4 - Невязки магнитометра с оценкой ухода ИНС

Данные результаты были получены на основе проведенного эксперимента по движению подводного аппарата, идущего на небольшой глубине. Два раза при движении подводного аппарата возникают магнитные аномалии от объектов, обладающих собственным магнитным полем. На рисунке 3 и 4 приведены невязки измерений магнитометра без оценки ухода ИНС и с оценкой ухода ИНС.

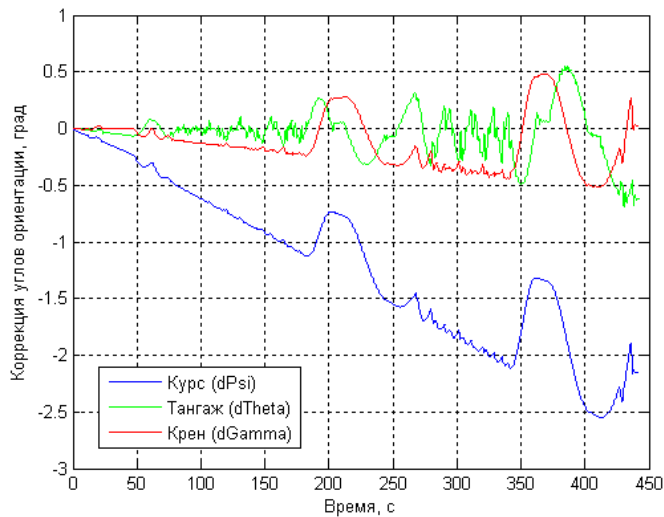


Рисунок 5 - Оценка ухода углов ориентации

Из представленных на рисунках 3 и 4 данных видим, что на 170 и 340 секундах наблюдаются магнитные аномалии.

На рисунке 5 приведена оценка ухода углов ориентации подводного аппарата, выдаваемых ИНС, выполненная на основе обработки измерений магнитометра.

Применение алгоритма компенсации углов ухода позволило уменьшить невязку измерений магнитометра и повысить его чувствительность к сторонним магнитным полям.

Таким образом, было получено, что комплексирование измерений магнитометра с показаниями инерциальной навигационной системы позволяют как повысить чувствительность и качество обнаружения магнитных аномалий, так и скомпенсировать ошибки ИНС.

В четвертой главе решается задача определения координат подводного аппарата с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Рассматривается движущийся подводный аппарат с возможностью всплытия на поверхность. На аппарате установлена аппаратура приема сигналов ГНСС. Необходимо за время кратковременного всплытия обеспечить определение вектора состояния движущегося подводного аппарата

$$X = [x \ y \ z \ B \ \Delta B], \quad (1)$$

где x , y , z – координаты подводного аппарата; B – смещение временной шкалы навигационного приемника относительно системного времени основной ГНСС; ΔB – смещение временной шкалы системного времени дополнительной ГНСС относительно системного времени основной ГНСС (в случае, если навигация осуществляется по двум ГНСС GPS/ГЛОНАСС).

В случае, если навигация осуществляется по одной ГНСС, вектор состояния представляет:

$$X = [x \ y \ z \ B] \quad (2)$$

В промежутках между всплываниями, вектор состояния системы вычисляется как

$$X = [x \ y \ z] = [x_{\text{инс}} + V_x(t-t_0) \ y_{\text{инс}} + V_y(t-t_0) \ z_{\text{инс}} + V_z(t-t_0)] \quad (3)$$

где t_0 – время последней ГНСС коррекции; $x_{\text{инс}}$, $y_{\text{инс}}$, $z_{\text{инс}}$ – текущая оценка координат подводного аппарата ИНС; t – текущее время; V_x , V_y , V_z – компоненты скорости дрейфа ИНС, вычисляемые в момент последней ГНСС коррекции:

$$V_x = (x_{\text{ГНСС}} - x_{\text{инс}}) / \Delta t; \quad V_y = (y_{\text{ГНСС}} - y_{\text{инс}}) / \Delta t; \quad V_z = (z_{\text{ГНСС}} - z_{\text{инс}}) / \Delta t \quad (4)$$

где $x_{\text{ГНСС}}$, $y_{\text{ГНСС}}$, $z_{\text{ГНСС}}$ – координаты подводного аппарата, определенные по измерениям ГНСС на момент коррекции ИНС; $x_{\text{инс}}$, $y_{\text{инс}}$, $z_{\text{инс}}$ – оценка координат подводного аппарата ИНС на момент ГНСС коррекции; Δt – время, прошедшее от последней до предпоследней ГНСС коррекции.

Пример схемы аппаратуры спутниковой навигации (подводный аппарат находится на водной поверхности) приведен на рисунке 6. Здесь НП – навигационный приемник, ЦБУ – центральный блок управления.

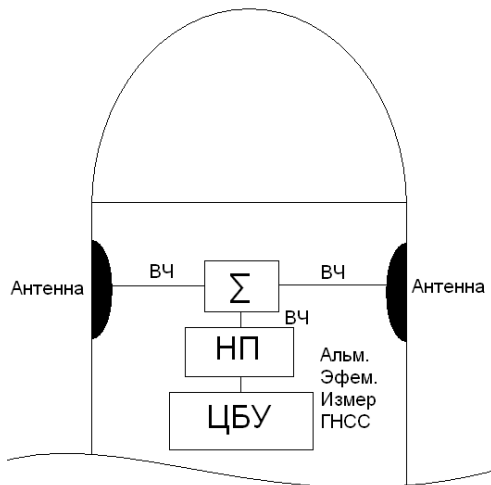


Рисунок 6 - Схема размещения аппаратуры спутниковой навигации в корпусе подводного аппарата

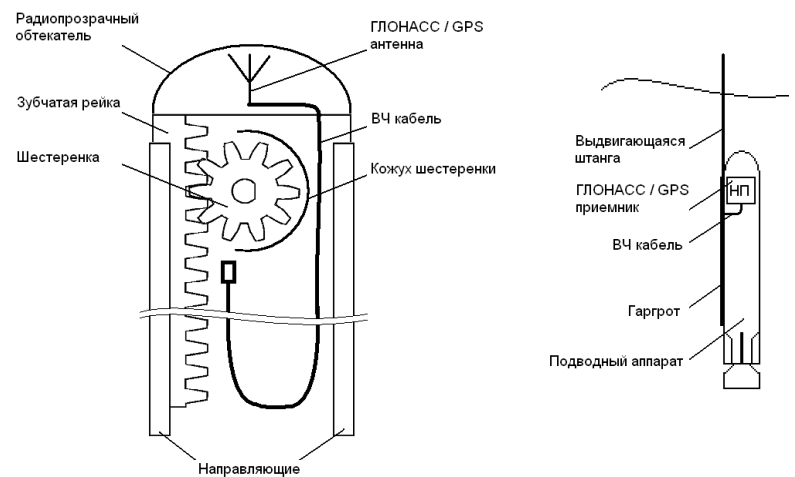


Рисунок 7 - Схема размещения аппаратуры спутниковой навигации в гаргроте подводного аппарата

Другой вариант расположения навигационной аппаратуры – в гаргроте снаружи подводного аппарата, на выдвигающейся штанге, вместе с примером

конструкции выдвигающейся штанги показан на рисунке 7. Сам подводный аппарат при этом остается под водой, что позволяет решать навигационную задачу даже при волнении моря.

Основной целью навигационной задачи является определение пространственно-временных координат потребителя, а также составляющих его скорости, поэтому в результате решения навигационной задачи должен быть определен расширенный вектор состояния потребителя X .

Решение навигационной задачи осуществляется за счет обработки навигационных измерений R_i между i -м навигационным спутником и потребителем. Модель измерений выглядит следующим образом:

$$R_i = R_i^u + B + b_i + \xi, \quad (5)$$

где R_i^u – расстояние от i -ого спутника до навигационного приемника; B – смещение временной шкалы навигационного приемника относительно системного времени ГНСС; b_i – смещение временной шкалы i -м навигационного спутника относительно системного времени ГНСС (передается в эфемеридах ГНСС); ξ – погрешности навигационных измерений.

В случае, если навигация осуществляется по двум ГНСС (основной и дополнительной) модель измерения выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} R_i^{осн} &= R_i^u + B + b_i^{осн} + \xi, \\ R_i^{дон} &= R_i^u + B + \Delta B + b_i^{дон} + \xi, \end{aligned} \quad (6)$$

где ΔB – смещение временной шкалы системного времени дополнительной ГНСС относительно системного времени основной ГНСС.

При использовании спутниковых навигационных систем в каждый момент времени подводный аппарат проводит измерения до N навигационных спутников.

Само решение навигационной задачи определения вектора состояния потребителя X в один момент времени t_k с использованием метода наименьших квадратов имеет следующий вид:

$$X_{k+1} = X_k + (H_k^T \cdot W_k^{-1} \cdot H_k)^{-1} \cdot H_k^T \cdot W_k^{-1} \cdot \Delta\eta^k, \quad (7)$$

где X_k – вектор состояния потребителя без учета измерений, проведенных в момент времени t_k , (априорный вектор потребителя); X_{k+1} – вектор состояния потребителя с учетом измерений, проведенных в момент времени t_k , (апостериорный вектор потребителя); W_k^{-1} – весовая матрица измерений, диагональная матрица, на главной диагонали которой находятся величины, обратные дисперсиям ошибок измерений; H_k – матрица частных производных (матрица измерений), $H = \frac{\partial \Delta R}{\partial X_k}$, $\Delta\eta$ – вектор невязок измерений, $\Delta\eta = \eta_{\text{ВЫЧ}} - \eta_{\text{ИЗМ}}$.

Вектор $\eta_{\text{ВЫЧ}}$ вычисляется на основе априорной информации о векторе состояния потребителя и эфемеридной информации, передаваемой в навигационных сообщениях. Вектор $\eta_{\text{ИЗМ}}$ определяется при помощи измерительного блока навигационного приемника.

В качестве метода, повышающего обусловленность решения навигационной задачи, можно использовать тот факт, что аппарат находится на поверхности Мирового океана. Поскольку, по определению, поверхность Мирового океана совпадает с поверхностью геоида, то, при использовании модели геоида, надводный потребитель с большей точностью знает свое расстояние до центра Земли, что позволяет решать навигационную задачу при недостаточном количестве спутников или на 15-20% повысить точность решения навигационной задачи при достаточном количестве спутников.

Предложенный алгоритм определения местоположения подводного аппарата с использованием ИНС и коррекций по измерениям ГНСС реализован в виде ПМО. Блок-схема построения системы ИНС+ГНСС навигации подводного аппарата приведена на рисунке 8. Результаты имитационного моделирования коррекции уходов ИНС подводного аппарата по измерениям ГНСС, полученным в момент кратковременного всплытия подводного аппарата, приведены на рисунках 9-10.

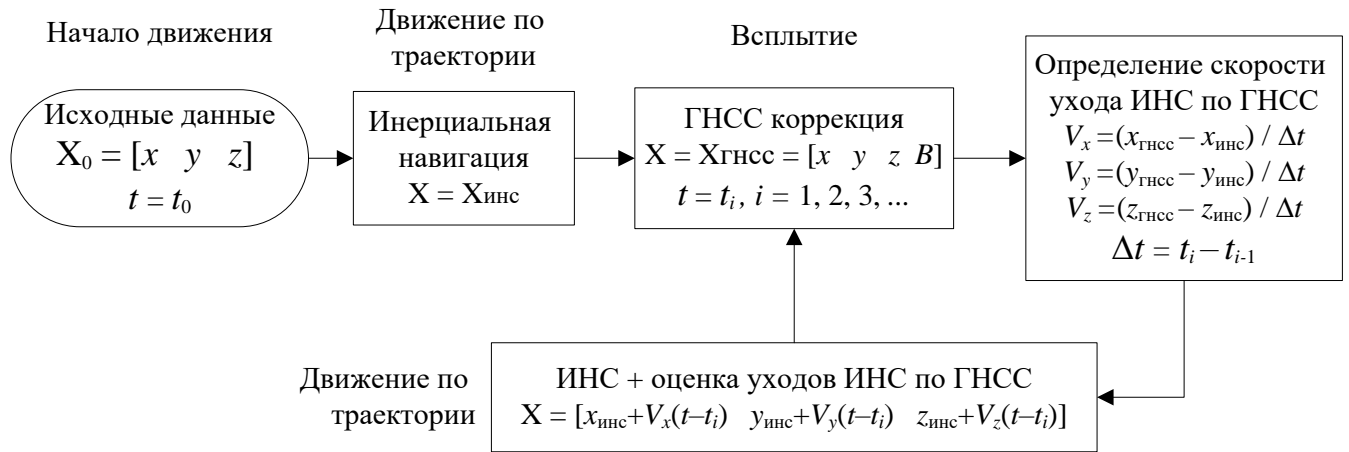


Рисунок 8 – Блок-схема системы ИНС+ГНСС навигации подводного аппарата

На рисунке 9 приведена моделируемая траектория подводного аппарата в вертикальной плоскости. На 950 и 2025 секундах подводный аппарат совершал всплытие с целью коррекции ИНС по измерениям ГНСС. На рисунке 10 приведена моделируемая траектория подводного аппарата в горизонтальной плоскости (пунктирная линия), и оценка траектории подводного аппарата на основе данных ИНС, у которой моделируется дрейф показаний чувствительных элементов (сплошная линия).

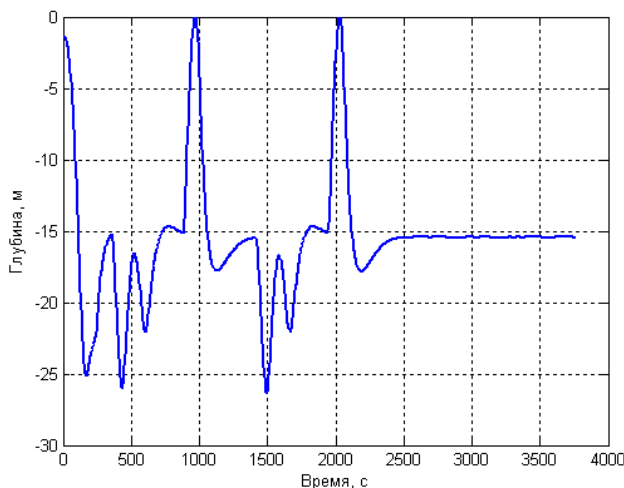


Рисунок 9 – Моделируемая траектория подводного аппарата в вертикальной плоскости

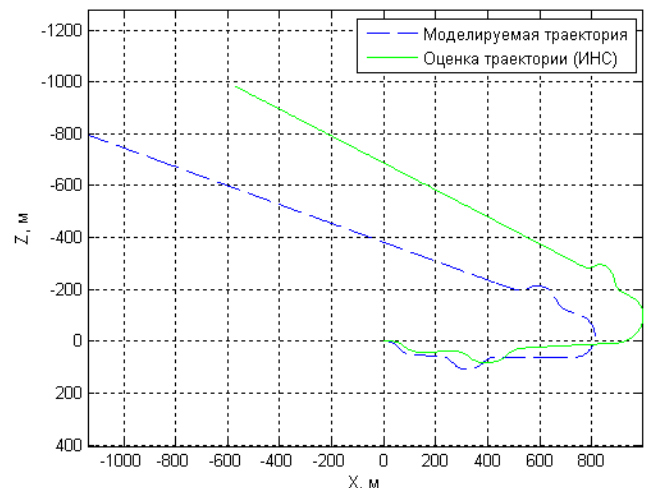


Рисунок 10 – Моделируемая траектория подводного аппарата и оценка траектории на основании данных ИНС

На рисунке 11 приведены для сравнения оценки траекторий (длинные пунктиры) и погрешности определения местоположения подводного аппарата с помощью только ИНС (короткие пунктиры) и ИНС и коррекциями по измерениям

ГНСС (сплошная линия). На рисунке 12 показаны погрешности навигации с использованием только данных ИНС (пунктирная линия) и с использованием данных ИНС+ГНСС.

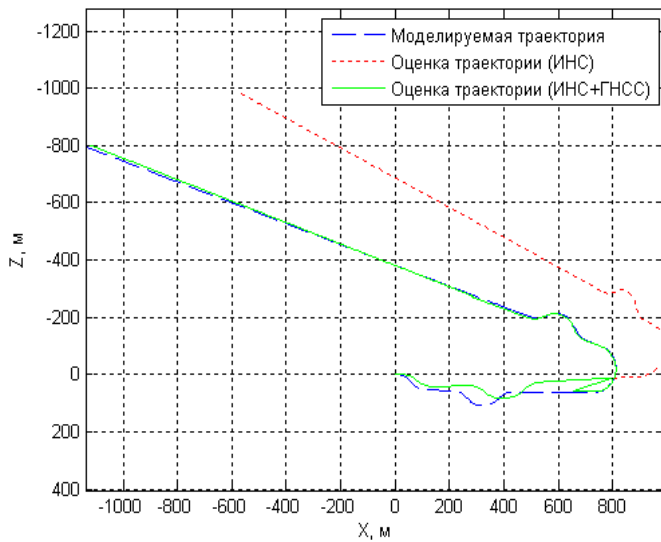


Рисунок 11 – Сравнение оценки траектории подводного аппарата с использованием данных только ИНС и данных ИНС+ГНСС

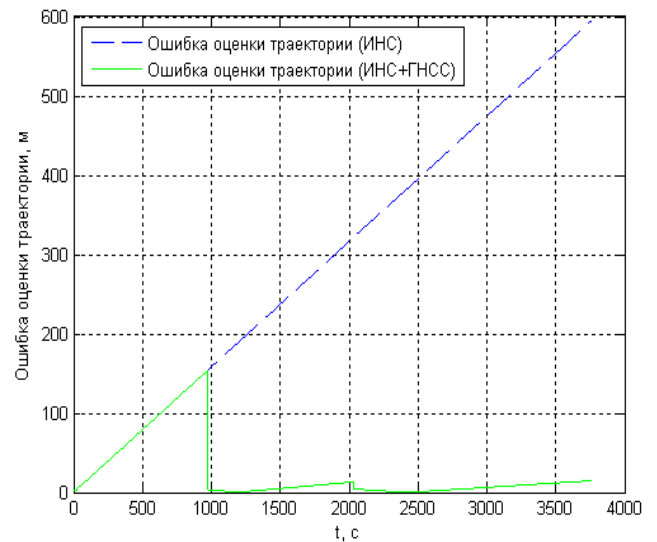


Рисунок 12 – Погрешности определения с использованием данных только ИНС и данных ИНС+ГНСС

Из представленных на рисунках 11 и 12 результатов моделирования видно, что применение коррекции ИНС с использованием ГНСС уменьшает погрешность определения координат подводного аппарата до приблизительно 10 м, в то время как без коррекции ИНС ошибки определения местоположения могут достигать 500-600 м.

В пятой главе решается задача вычисления уточненной эфемеридно-временной информации для повышения точности навигации подводного аппарата с использованием измерений от спутниковых навигационных систем.

Вначале была рассмотрена задача определения форматов передачи дифференциальных поправок, которые могут быть использованы для передачи дифференциальных данных. Поскольку для подводного аппарата, всплывшего на поверхность на некоторое время, актуальным является уменьшение времени получения дифференциальных данных. Существующие форматы передачи данных – форматы SBAS и RTCM-104 – не ограничены временем передачи

дифференциальных данных потребителю и они содержат ряд дополнительной информации, не требующейся при навигации подводного аппарата.

Были предложены варианты формирования и схемы передачи дифференциальных данных для уменьшения времени навигации подводного аппарата. Дифференциальные поправки включают в себя как быстро меняющиеся данные (коррекция частотно-временных поправок), так и медленно меняющиеся данные (коррекция эфемеридно-временной информации). Также передается информация о целостности данных. При использовании двухчастотной навигационной спутниковой аппаратуры данные варианты требуют передавать существенно меньший объем данных, по сравнению с системами SBAS. Получено, что применение разработанных форматов передачи дифференциальных данных, позволит войти в дифференциальный режим за время, не превышающее 5 секунд.

Следующей задачей, которая была рассмотрена в диссертационной работе, была разработка алгоритмов и программного обеспечения вычисления уточненной эфемеридно-временной информации на основе использования беззапросных измерений от навигационных спутников ГНСС. Данные измерения собираются при помощи глобальной сети измерений.

При оценке вектора состояния системы ГНСС использовался метод декомпозиции. Вектор состояния системы разбивается на два вектора:

$X_{cm} = | B_{cm1} \dots B_{cmN} |$ – вектор ухода часов N станций сбора измерений,

и $X_{nka} = | B_{nka1} \dots B_{nka24} |$ – вектор ухода часов спутников.

Далее задается начальное значение X_{nka} – например, из бортовых эфемерид, либо используется другая априорная информация.

Затем на каждый момент времени определяется вектор состояния X_{cm} по дальномерным измерениям при помощи метода наименьших квадратов, после чего уточняется вектор X_{nka} .

В дальнейшем, начальное значение X_{nka} берется из предыдущей итерации.

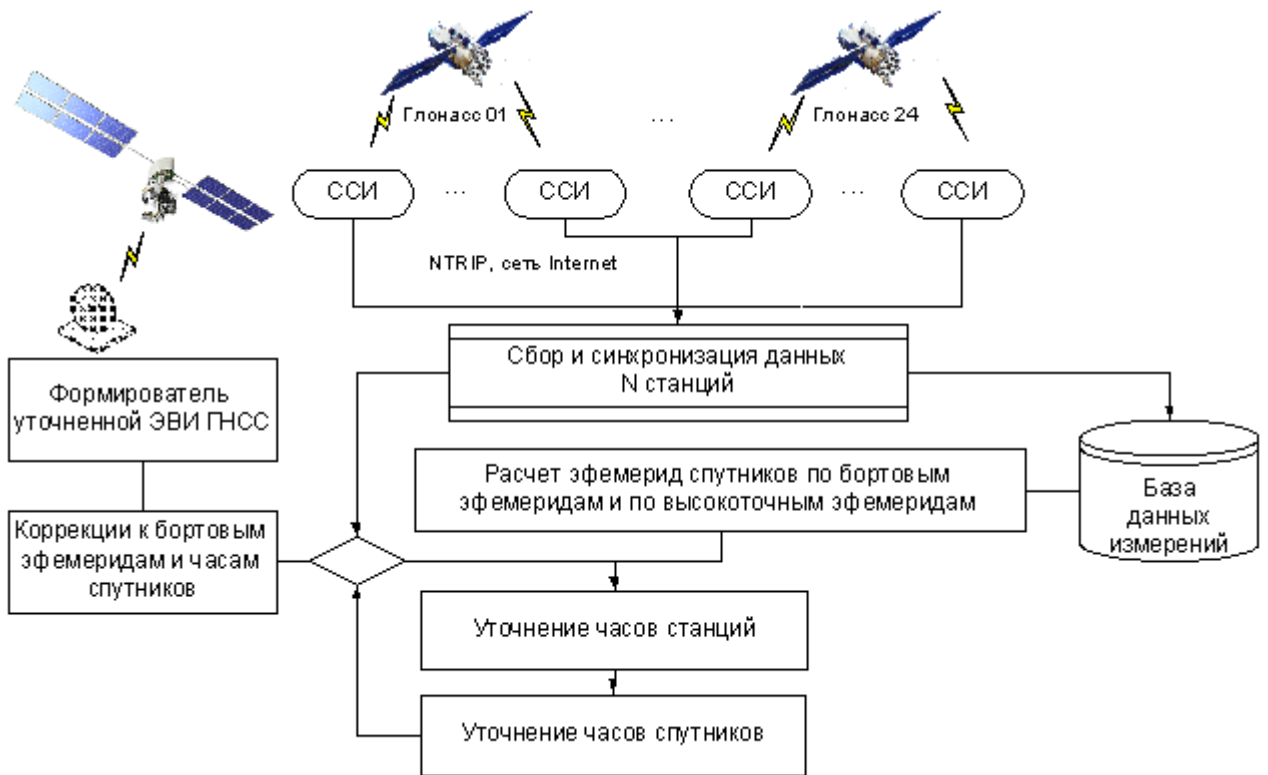


Рис. 13 – Блок-схема алгоритма уточнения ЭВИ в реальном времени

На рисунке 13 приведена укрупненная блок-схема алгоритма вычисления уточненной ЭВИ в реальном времени по измерениям с сети станций измерений.

На основе приведенного выше алгоритма по декомпозиции задачи, было разработано программно-математическое обеспечение, предназначенное для сбора, синхронизации и обработке измерений от станций в реальном времени по протоколу NTRIP и вычисления уточненной ЭВИ ГНСС.

В таблице 1 приведены результаты вычисления уточненной ЭВИ ГЛОНАСС, полученные на интервале с 16.08.2015 по 18.08.2015. Для оценки качества уточнения ЭВИ ГНСС ГЛОНАСС для 18 станций сбора измерений решалась навигационная задача определения местоположения. Результаты навигационного решения сравнивались с известными координатами станций (координаты которых известны с сантиметровой точностью). Для сравнения в таблице приведены погрешности решения навигационной задачи с использованием бортовой ЭВИ.

Таблица 1 – Результаты вычисления уточненной ЭВИ ГЛОНАСС

Станция сбора измерений	Погрешность навигации, м					
	СКО погрешности в плоскости		СКО погрешности по высоте		СКО 3D погрешности	
	Бортовая ЭВИ	Уточненная ЭВИ	Бортовая ЭВИ	Уточненная ЭВИ	Бортовая ЭВИ	Уточненная ЭВИ
ARTI1	3.55	0.70	6.51	0.93	7.42	1.16
IRKM1	3.79	0.71	5.52	0.93	6.69	1.17
BILP1	4.15	0.87	8.31	1.40	9.28	1.65
GELE1	4.31	0.85	6.62	1.05	7.90	1.35
KMCH1	4.74	1.07	7.20	1.35	8.61	1.72
KSLV1	4.01	0.98	6.26	1.17	7.44	1.52
NORI1	3.59	0.69	7.76	1.34	8.55	1.51
NOVL1	3.76	0.93	7.86	0.90	8.72	1.29
NOVS1	3.66	0.76	5.95	1.04	6.99	1.29
NOYB1	3.79	0.77	7.29	1.13	8.22	1.37
MAGA1	3.76	0.75	6.48	1.08	7.50	1.32
MEND1	3.29	0.89	5.80	1.11	6.67	1.42
REVD1	3.05	0.66	7.30	1.22	7.92	1.39
SVET1	3.82	1.00	7.45	1.32	8.37	1.66
VLAD1	3.97	1.03	5.55	1.34	6.82	1.69
YKTS1	4.23	1.02	7.60	1.21	8.70	1.58
YUSA1	3.84	0.94	5.98	1.34	7.11	1.64
PRGS1	3.29	0.87	4.04	1.09	5.21	1.40
Средняя	3.81	0.86	6.63	1.16	7.67	1.45

Приведены погрешности навигации в плоскости, по вертикали и в пространстве (3D).

Из представленных в таблице 1 данных видим, что применение вычисленной уточненной ЭВИ повышает точность навигации в 5-6 раз.

ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

На основе результатов, полученных в диссертации, сделаны следующие выводы:

1. Разработан метод калибровки магнитометра на движущемся подводном аппарате и комплексирования измерений магнитометра с ИНС с определением ухода углов курса, тангажа и крена, измеренных гироскопом.
2. Решена задача определения координат подводного аппарата с использованием ГНСС. Результаты имитационного моделирования показали, что применение коррекции ИНС с использованием ГНСС уменьшает погрешность определения координат подводного аппарата до 10 м, в то время как без коррекции ИНС ошибки определения местоположения возрастают до 500-600 м и выше.
3. Предложен метод повышения обусловленности навигационной задачи подводного аппарата, находящегося на поверхности Мирового океана. Зная координаты точки старта и используя модель поверхности геоида, совпадающей с поверхностью Мирового океана, рассчитывается расстояние от поверхности геоида до центра Земли. Использование этих данных позволяет решать навигационную задачу при недостаточном количестве спутников или на 15-20% повысить точность решения навигационной задачи при достаточном количестве спутников.
4. Разработаны варианты формирования и схемы передачи дифференциальных данных для уменьшения времени навигации подводного аппарата. Дифференциальные поправки включают в себя быстро меняющиеся данные, медленно меняющиеся данные и информация о целостности данных.
5. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение для решения задачи вычисления уточненной ЭВИ ГНСС. Результаты использования вычисленной уточненной ЭВИ ГЛОНАСС показали, что применение уточненной ЭВИ повышает точность навигации в 5-6 раз по сравнению с бортовой ЭВИ ГЛОНАСС и позволяет подводному аппарату при всплытии определить свое местоположение с точностью менее 1 м (СКО) за время, не превышающее 5 секунд.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 печатных работах, из них три в ведущих рецензируемых научных журналах, определённых Высшей аттестационной комиссией Министерства образования и науки Российской Федерации, тезисы в 2 международных конференциях и 1 публикация в научно-техническом сборнике:

1. *Дворкин В.В., Куршин А.В.* Развитие системы ГЛОНАСС и аппаратуры потребителей для высокодинамичных объектов // Ракетно-космическая техника: научно-технический сборник. Сер XI. «Системы управления ракетных комплексов. – Выпуск 1», Екатеринбург: ФГУП «НПО автоматики им.академика Н.А.Семихатова», 2014, стр.42-48.
2. *Куршин А.В.* Повышение точности определения местоположения потребителей ГЛОНАСС путем увеличения частоты закладок временной информации на спутники // Труды МАИ. – М.: 2012, № 57, 7 стр.
3. *Куршин А.В.* Орбитальное построение космического сегмента широкозонного функционального дополнения ГЛОНАСС на высокоэллиптических орбитах // Сборник тезисов докладов 17 международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация». - М.: Изд-во МАИ, 2012, стр. 105-106.
4. *Куршин А.В.* Модифицированный навигационный алгоритм для определения положения ИСЗ по сигналам GPS/ГЛОНАСС // Труды МАИ. – М.: 2013, № 66, 9 стр.
5. *Куршин А.В.* Навигация искусственного спутника Земли в условиях прерывного навигационного поля ГЛОНАСС // Сборник тезисов докладов XVIII международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация». - М.: Изд-во МАИ, 2013, стр. 119.
6. *Ступак Г.Г., Бетанов В.В., Куршин В.В., Куршин А.В.* К вопросу построения региональной орбитальной группировки навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС // Известия РАН, 2016, №3(93), стр. 122-129.