

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

На правах рукописи

Филатова Гузель Амировна

**НАВИГАЦИЯ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ
ПОМОЩИ БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ
СИСТЕМЫ**

Специальность 01.02.01 — теоретическая механика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва, 2017

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Задачам освоения и исследования Мирового океана уже давно уделяется большое внимание. Одним из основных средств исследований в настоящее время являются автономные подводные аппараты (АПА). Малая инерционность, быстрая подготовка к работе, автономность, возможность установки на борт различного оборудования — все эти факторы позволяют применять АПА для широкого круга научных и прикладных задач.

АПА может погружаться в определенный район океана на заданную глубину, двигаться по заданному маршруту, выполнять требуемые работы и по окончании программы возвращаться в указанную позицию. Основное место разработки АПА в России — это Институт проблем морских технологий им. М.Д. Агеева ДВО РАН (г. Владивосток), с которым лабораторией управления и навигации МГУ им. М.В. Ломоносова налажены контакты.

Ключевым фактором эффективности АПА является точность его навигационной системы. От нее зависит и успешность выполняемых работ, и ценность полученных данных. Именно поэтому разработка высокоточных навигационных систем для АПА является актуальной задачей сегодня.

Цели работы

- Обосновать целесообразность и показать эффективность построения навигационной системы АПА на базе бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС).
- Разработать алгоритм работы такой системы, в которой БИНС строится на базе существующих блоков инерциальных датчиков, а для коррекции используется информация от бортовой и гидроакустической навигационных систем АПА.
- Исследовать точность построенного алгоритма на типовых траекториях движения АПА.
- Разработать калибровочный режим, учитывающий особенности устройства АПА, который позволит оценить инструментальные погрешности, изменяющиеся от запуска к запуску, и тем самым повысить точность навигационных данных.
- Предложить способ оценки погрешности определения дальности при помощи гидроакустической навигационной системы, не требующий проведения предварительных работ.

Методы исследования, достоверность и обоснованность результатов

В работе используются методы теоретической механики, теории инерциальной навигации, теории оптимального оценивания, линейной алгебры, элементы теории случайных процессов. Исходные соотношения инерциальной навигации, модели инструментальных погрешностей БИНС, уравнения ошибок БИНС — являются общепринятыми.

Работоспособность всех представленных алгоритмов проверена при помощи ковариационного анализа и моделирования с использованием экспериментальных данных.

Научная новизна

Главная особенность работы состоит в том, что, в отличие от существующих систем, предлагается построить навигационную систему на базе корректируемой БИНС. Доказывается целесообразность и высокая эффективность предложенной структуры.

Новыми являются алгоритмы навигации АПА, учитывающие специфику его движения и состав аппаратуры. Предложены и обоснованы новые способы, повышающие точность навигации за счет калибровочных режимов как для БИНС, так и для корректирующих средств.

Теоретическая и практическая ценность

Теоретическая ценность данной работы заключается в том, что полученные результаты служат обоснованием принципиальной возможности использования БИНС приемлемого класса для высокоточной навигации АПА, а также доказывают целесообразность предложенного решения.

Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные методы и алгоритм могут быть рекомендованы к применению для решения задачи навигации АПА с высокой точностью как в реальном времени, так и в постобработке. И 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.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на следующих научно-технических семинарах и конференциях:

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, автоматизации 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.

Публикации Основные результаты по теме диссертации изложены в **5** печатных изданиях, **2** из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, **3** — в тезисах докладов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Полный объем диссертации **94** страниц текста с **28** рисунками и **2** таблицами. Список литературы содержит **46** наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность решаемой задачи, формулируется научная новизна и практическая значимость представляемой работы, приводится обзор литературы по теме диссертации. Также представлено краткое содержание работы, перечислены публикации и доклады по теме исследования.

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.

Основными направлениями при разработке АПА сегодня является повышение их мобильности и экономической эффективности. С этим связана разработка новых видов гидроакустических навигационных систем (ГАНС), одной из которых является ГАНС с синтезированной длинной базой (ГАНС СДБ). Предполагается использовать единственный мобильный маяк, который может буксироваться сопровождающим судном или автономным водным аппаратом (АВА). В качестве ГАНС 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. Далее все исследования предполагают именно конструкцию АПА с ГАНС СДБ.

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.

Далее предполагается, что на борту подводного аппарата организуется бескарданная навигационная система (БИНС) среднего класса точности. Приборной основой БИНС служат установленные блоки из трех ньютометров, трех датчиков угловой скорости (ДУС) и бортовой вычислитель. Для реализации БИНС выбраны ньютометры MEMS и волоконно-оптические ДУС.

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

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. Выводятся 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.

Для построения алгоритма коррекции БИНС вводятся модельные уравнения, использующие относительные линейные скорости, а в качестве опорного трехгранника — географический трехгранник Mx с географической азимутальной ориентацией, и в качестве параметров ориентации — элементы матриц направляющих косинусов. Штрихом обозначаются модельные переменные.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}'_x &= (\hat{\Omega}'_x + 2\hat{u}'_x) V'_x + f'_x + g'_x \\
 u'_x &= (0, u \cos \varphi', u \sin \varphi')^T \\
 \Omega'_x &= \left(-\frac{V'_2}{a+h'}, \frac{V'_1}{a+h'}, \frac{V'_1 \tan \varphi'}{a+h'}\right) \\
 f'_x &= L'_{xz} f'_z, \\
 \dot{L}'_{xzT} &= \hat{\omega}'_z L'_{xzT} - L'_{xzT} (\hat{u}'_x + \hat{\Omega}'_x), \\
 \dot{B}'_{x\eta} &= \hat{\Omega}'_x B'_{x\eta} \\
 \gamma' &= \operatorname{arctg} \frac{l_{33}}{l_{31}}, \\
 \vartheta' &= \operatorname{arctg} \frac{l_{31}}{\sqrt{l_{33}^2 + l_{32}^2}}, \\
 \psi' &= \operatorname{arctg} \frac{l_{11}}{l_{21}} \\
 \lambda' &= \operatorname{arctg} \frac{b_{32}}{b_{31}}, \\
 \varphi' &= \operatorname{arctg} \frac{b_{33}}{\sqrt{b_{12}^2 + b_{23}^2}},
 \end{aligned}$$

где V — вектор скорости объекта относительно Земли; Ω — вектор угловой скорости трехгранника относительно Земли; ω — вектор абсолютной уг-

ловой скорости трехгранника; u – вектор угловой скорости вращения Земли; a – большая полуось земного эллипсоида; g – модуль удельной силы тяжести; φ, λ, h – широта, долгота, высота – географические координаты точки; ψ – угол курса, γ – угол крена, ϑ – угол тангажа; $L_{xz} = (l_{ij})$ – матрица ориентации опорного трехгранника Mx относительно приборного Mz ; $B_{x\eta} = (b_{ij})$ – матрица ориентации опорного трехгранника Mx относительно гравитационного $O\eta$.

Вектор X – вектор независимых параметров, описывающий состояние системы «Материальная точка – Приборный трехгранник», состоит из следующих компонент:

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

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

$$Y' = (V'_1, V'_2, V'_3, b_1'^T, b_2'^T, l_1'^T, l_2'^T)^T$$

Для вектора Y существуют соотношения:

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

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

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

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. Модель инструментальных погрешностей ньютометров и ДУС имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta f_z &= \Delta f_z^0 + \Delta f_z^s, \\ \nu_z &= \nu_z^0 + \nu_z^s, \end{aligned}$$

где $\Delta f_z^0 = (\Delta f_{z_1}^0, \Delta f_{z_2}^0, \Delta f_{z_3}^0)^T$, $\nu_z^0 = (\nu_{z_1}^0, \nu_{z_2}^0, \nu_{z_3}^0)^T$ — постоянные составляющие погрешностей, $\Delta f_z^s = (\Delta f_{z_1}^s, \Delta f_{z_2}^s, \Delta f_{z_3}^s)^T$, $\nu_z^s = (\nu_{z_1}^s, \nu_{z_2}^s, \nu_{z_3}^s)^T$ — высокочастотные составляющие типа белого шума.

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:

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

где $\nu_x = (\nu_1, \nu_2, \nu_3)^T = L_{xz} \nu_z$ — погрешность измерения угловой скорости, $\Delta f_x = L_{xz} \Delta f_z$ — погрешность измерения внешней силы, $\omega_0^2 = \frac{g}{R} =$

$1.25 \cdot 10^{-3}$ 1/сек — частота Шулера. С точностью до членов второго порядка малости можно использовать матрицу L , определяемую в бортовом вычислителе БИНС.

В качестве датчиков дополнительной навигационной информации используются гидроакустический датчик дальности до наводного маяка с известными координатами, доплеровский лаг и глубиномер. Вектор коррекции z включает в себя компоненты $z = (z^D, z^H, z_1^V, z_2^V)^T$:

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

где $\rho^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^{M^2}}$, $d = (\frac{y_1^M}{\rho^*}, \frac{y_2^M}{\rho^*}, \frac{y_3^M}{\rho^*})^T$. Погрешность измерения дальности включает в себя систематическую составляющую — ρ^{D^0} и высокочастотную погрешность типа белого шума — ρ^{D^S} . Погрешность измерения глубины ρ^{H^S} — высокочастотная погрешность типа белого шума, k^V — масштабный коэффициент погрешности измерения скорости, ρ^{V^S} — высокочастотная составляющая типа белого шума.

Вектор состояния системы уравнений ошибок БИНС имеет вид:

$$\kappa = (\Delta y_1, \Delta y_2, \Delta y_3, \delta V_1, \delta V_2, \delta V_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \nu_{z_1}, \nu_{z_2}, \nu_{z_3}, \Delta f_{z_1}^0, \Delta f_{z_2}^0, \Delta f_{z_3}^0, \rho^{D^0}, k^V)^T$$

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

$$x = X - X' = C\kappa \quad (1)$$

При этом вектор x имеет следующий вид:

$$x = (\Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta h, \Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \Delta \theta, \Delta \gamma, \Delta \psi)^T \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta \varphi &= \frac{\Delta y_2}{a + h'}, \\ \Delta \lambda &= \frac{\Delta y_1}{(a + h') \cos \varphi}, \\ \Delta h &= \Delta y_3, \\ \Delta V_1 &= \delta V_1 + V_2 \beta_2 + V_3 \left(\frac{\Delta y_1}{a} - \beta_2 \right), \end{aligned}$$

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

Структура алгоритма коррекции с введением обратных связей:

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:

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

3. В вычислителе БИНС решаются модельные уравнения:

$$Y_j^- = F_j^y(Y_{j-1}^+, U'_j), \quad Y'_{j=0} = \phi^y(X'_0).$$

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 $\tilde{\kappa}_j^+$.

6. С учетом информации о $\tilde{\kappa}_j^+$ рассчитывается вектор \tilde{X}_j^+ :

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

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

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

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

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

Заключение ко второй главе: 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.

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. Реальные данные предоставлены ИПМТ им. М.Д. Агеева ДВО РАН. Автор выражает благодарность сотрудникам этого института, а именно канд. тех. наук Ф.С. Дубровину, канд. тех. наук И.Е. Туфанову.

Анализ точности производился в рамках ковариационных соотношений. Были выбраны априорные стандартные отклонения погрешностей датчиков БИНС среднего класса точности: $\sigma_{\Delta f^0} = 0.005 \text{ м/с}^2$; $\sigma_{\nu^0} = 10^\circ/\text{час}$; $\sigma_{\Delta y} = 10 \text{ м}$; $\sigma_{\delta V} = 0.1 \text{ м/с}$; $\sigma_{\beta_1} = \sigma_{\beta_2} = 0.5^\circ$; $\sigma_{\beta_3} = 1^\circ$; $\sigma_{\rho^D^0} = 5 \text{ м}$; $\sigma_{k^V} = 0.01 \text{ (б/р)}$. Для шумов в системе и измерениях берутся следующие значения стандартных отклонений, приведенных к частоте 1 Гц.: $\sigma_{\Delta f^s} = 0.02 \text{ м/с}^2$; $\sigma_{\nu^s} = 90^\circ/\text{час}$; $\sigma_{\rho^D^s} = 1 \text{ м}$; $\sigma_{\rho^V^s} = 0.01 \text{ м/с}$.

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. 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. На данных движениях были проведены испытания комплекса, в том числе и навигационной системы без использования БИНС. 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 показали, что СО ошибки оценки координат устанавливаются на значениях менее 3 метров после первых 2 минут движения аппарата, и достигает значения менее 2 метров во второй половине отрезка движения.

Полученные результаты показывают, что использование БИНС дает возможность повысить точность примерно в 3 раза. Важно отметить причины этого обстоятельства. Именно благодаря использованию корректируемой БИНС оценивается кинематическая ошибка определения ориентации и за счет этого повышается точность определения координат.

Также было проведено моделирование на основе одного из примеров экспериментальных траекторий, приведенных выше. Именно, рассмотрен случай, когда АПА движется по прямой, а АВА (маяк ГАНС) совершает движение 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 информация 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.

Оценки координат, полученные на выходе алгоритма, сравнивались с эталонными параметрами. Статистика погрешностей приведена в таблице 1.

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

	Mean	St. Dev.	Min	Median	Max
$\Delta r_N, \text{ м}$	1,15836	1,6087	-0,362	0,1935	4,383
$\Delta r_E, \text{ м}$	-0,12123	0,75381	-1,898	0,258	1,062

Таблица 1: Статистика погрешностей

Заключение к третьей главе: 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.

Четвертая глава посвящена разработке метода подготовки навигационной системы перед погружением, цель которой — повышение точности навигации на начальных этапах движения за счет предварительной оценки инструментальных погрешностей БИНС. 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.

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).

Стендовая калибровка БИНС не решает полностью проблемы оценки параметров модели инструментальных погрешностей БИНС данного класса, так как у датчиков (ДУС и ньютонетров) имеются погрешности нулей, меняющиеся от запуска к запуску (т.е. индивидуальные в каждом запуске).

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

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 $\psi = 0^\circ$ по часовой стрелке со скоростью $10^\circ/\text{с}$;
3. Вращение в горизонтальной плоскости вокруг продольной оси с курсом $\psi = 90^\circ$ против часовой стрелки со скоростью $10^\circ/\text{с}$.

Задача сводится к оценке вектора состояния следующей системы:

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

при помощи измерений:

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

Вектор состояния системы имеет вид:

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

Результаты ковариационного анализа показали, что постоянная ошибка продольного ньютонометра не оценивается. Попытки разработки способа и устройства для калибровки БИНС, установленной на АПА, в каждом запуске не приводят к успеху из-за конструктивных особенностей АПА.

Поэтому предлагается следующий режим калибровки путем организации специального движения АПА перед выполнением миссии:

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.

Так же, как и в прошлой главе, ставится задача оценки вектора состояния κ 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:

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

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

$$\begin{aligned} z_1^{pos} &= \Delta y_1 + \rho_{pos1}^s, \\ z_2^{pos} &= \Delta y_2 + \rho_{pos2}^s, \\ z_1^{vel} &= \delta V_1 + V_2 \beta_3 + \rho_{vel1}^s, \\ z_2^{vel} &= \delta V_2 - V_1 \beta_3 + \rho_{vel2}^s, \end{aligned} \tag{3}$$

где Δy_1 , Δy_2 — полные ошибки местоположения; δV_1 , δV_2 — динамические ошибки определения относительной скорости; ρ_{pos1}^s , ρ_{pos2}^s — высокочастотные погрешности позиционной информации от СНС типа белого шума, ρ_{vel1}^s , ρ_{vel2}^s — высокочастотные погрешности скоростной информации от СНС типа белого шума.

Эффективность предложенного режима проверяется результатами ковариационного анализа. Как и в четвертой главе исследуются два типа движения — по траекториям «Зигзаг» и «Квадрат». Значения СО ошибок оценок координат при использовании алгоритма калибровочного режима заметно меньше аналогичных значений, полученных без использования алгоритма на первых этапах движения аппарата.

Заключение к четвертой главе: калибровочный режим перед погружением может использоваться для навигации в реальном времени с целью получения более точных оценок с самого начала движения АПА.

В пятой главе описывается способ оценки погрешности гидроакустической навигационной системы, предназначенный для оценки эффективной скорости звука в воде, для оценки которой обычно проводятся предварительные работы.

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

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

Вектор состояния уравнений ошибок, включая масштабный коэффициент:

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

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

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. Оценка производилась на тех же, что и ранее, опорных траекториях.

Кавариационный анализ показал, что ошибка оценки погрешности масштабного коэффициента (СО) уменьшается 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.

Заключение к пятой главе: анализ показал, что при 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.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Заключение

Основной результат работы состоит в том, что, в отличие от существующих решений, предлагается построить навигационную систему АПА на базе корректируемой БИНС. Доказывается целесообразность и высокая эффективность такой структуры. Более детально, 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 по крайней мере, в 3 раза. 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.

Публикации автора по теме диссертации

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, автоматизации и обработки информации», Сборник материалов, Алушта, Россия, 2015.
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.