

Чан Танг Дык

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ
ОРИЕНТАЦИИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ СУДНА
НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2014

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)» на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС)

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Боронахин Александр Михайлович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник ФГУП «Ростовский НИИ радиосвязи»,

Погорелов Вадим Алексеевич

кандидат технических наук, начальник сектора ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,

Литвиненко Юлия Александровна

Ведущая организация – ОАО «Гирооптика» (г. Санкт-Петербург).

Защита состоится « 24 » декабря 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.06 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, ауд. 5108.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПбГЭТУ: www.eltech.ru

Ваши отзывы и замечания по автореферату (в двух экземплярах), заверенные печатью, просим высылать по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5, СПбГЭТУ, секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «23» октября 2014 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.238.06

д.т.н., доцент



/А.М. Боронахин /

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В течение многих лет системы управления движением морских подвижных объектов улучшались и эволюционировали, главным образом, благодаря развитию средств измерения кинематических параметров [1]. Реализованные возможности измерения угловой скорости рыскания судна, дрейфа, географических координат приводили к появлению систем стабилизации курса и путевого угла, систем стабилизации на заданной траектории и т.д. [2].

В настоящее время ситуация изменилась. Современные средства навигации могут измерять параметры движения морских подвижных объектов практически с любой заданной точностью, которая достигается комплексированием разных источников информации и высокой производительностью средств обработки навигационных данных [3]. Однако также следует отметить, что высокоточные навигационные системы остаются дорогостоящими и их применение может оказаться нерентабельно.

Таким образом, если раньше задача построения системы управления напрямую зависела от возможностей навигационного обеспечения, то сейчас можно говорить об обратном: проектировщик системы вправе самостоятельно выдвигать требования к точности измерения кинематических параметров. Соответственно, обеспечение требуемых показателей качества системы при заданных погрешностях измерений представляет собой принципиально новую задачу управления.

При описании задачи управления, очевидно, в математическую модель объекта должна быть включена модель динамических погрешностей средств измерения. Неординарность задачи обусловлена тем, что вид модели динамических погрешностей изначально может быть неизвестен. Действительно, выбор структуры и состава информационно-измерительной системы делается на основе требований к качеству измерений выходных координат, которые, в свою очередь, обусловлены качеством управления, обеспечиваемого синтезируемыми законами. Можно предложить два варианта выхода из «замкнутого круга» [4]:

1. Выдвинуть предположение о том, что структура информационно-измерительной системы является известной, и дополнительному определению подлежат только параметры модели динамических погрешностей, зависящие от конкретных устройств измерения. На практике предварительное согласование состава средств измерения не представляет большого труда. В этом случае математическая модель объекта и средств измерений становится неопределенной лишь параметрически, и задачу можно решать методами, сходными с синтезом робастного управления. Главным недостатком такого подхода видится следующее: если в случае недостижимости требуемого качества измерения придется изменять структуру информационно-измерительной системы, задачу следует решать заново, при том результативность решения данной задачи также не гарантирована.

2. Получить предварительное решение задачи синтеза для упрощенной модели – без учета динамики изменения погрешностей – на основе стохастического подхода. В этом случае вектор погрешностей предполагается случайным процессом с нормальным распределением, ковариация которого задана некоторым образом. Варьируя величину ковариации, можно для каждого значения решать задачу синтеза и, исследуя свойства замкнутой системы, сформировать требования к качеству измерения именно через ковариацию случайного процесса погрешности каналов измерения. В

случае, когда структура информационно-измерительной системы заранее не определена, такой способ является единственно возможным.

В диссертации исследуется влияние погрешностей измерения на динамику системы управления движением судна на подводных глубокопогруженных крыльях (СПК) в вертикальной плоскости. По результатам исследований формируются требования к точности измерения кинематических параметров [1].

Цель работы:

Разработка схемы построения и алгоритмов работы интегрированной системы ориентации – гировертикали – на основе блока магнитометров, датчика угловой скорости (ДУС) и блока акселерометров для определения кинематических параметров системы управления СПК с глубоко погруженными крыльями (ГПК) с заданными точностными характеристиками.

Непосредственными задачами исследования являются:

1. Анализ современных интегрированных систем ориентации морского применения и их точности;
2. Выработка требований к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов;
3. Разработка структуры построения системы ориентации для решения задачи управления движением СПК с ГПК;
4. Анализ качества управления вертикальным движением СПК с ГПК при использовании интегрированной системы ориентации.

Методы исследования.

Разработка структуры построения и алгоритмов работы предлагаемой интегрированной системы ориентации базируется на использовании положений общей теории навигации, инерциальной навигации и теории фильтрации. Постановка прикладных задач анализа и оценки системы основана на методологии разработки алгоритмов с использованием концепции объектно-ориентированного программирования для моделирования, имитации и анализа динамических систем.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Обеспечение устойчивой работы системы управления СПК выполняется при организации измерений кинематических параметров управления движением с привлечением динамических настраиваемых фильтров.
2. Гировертикаль, построенная на одном ДУС, трех акселерометрах и трех магнитометрах, позволяет обеспечить измерение кинематических параметров системы управления с заданным требованием к их точностным характеристикам.
3. Разработка интегрированной системы ориентации позволяет снизить погрешности кинематических параметров управления вертикальным движением при использовании комплексирования информации, поступающей от спутниковой навигационной системы (СНС).

Научная новизна работы

В процессе проведения исследований получены новые научные результаты:

1. Исследована задача управления СПК и выработано требование к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением СПК.
2. Разработан алгоритм работы гировертикали на базе одного ДУС, трех акселерометров и трех магнитометров, позволяющий определить кинематические параметры системы управления с заданным требованием к их точностным характеристикам.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработано программное обеспечение гировертикали в пакете MATLAB (Simulink), позволяющее моделировать работу интегрированной системы в различных режимах с использованием модельных данных.

2. Предложенный алгоритм позволяет определить кинематические параметры управления движением судна на подводных крыльях. Оптимальный фильтр Калмана (ОФК) обеспечивает получение оценки кинематических параметров управления движением с погрешностью, не превышающей некоторый заранее определяемый уровень.

Реализация и внедрение результатов исследования

Результаты, полученные в работе, внедрены в учебный процесс на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем и могут быть также использованы в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) при проведении научно-исследовательских работ.

Апробация работы

Материалы исследований докладывались и обсуждались на научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), (2011-2013), Санкт-Петербург, Россия.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 4 статьи (из них 3 статьи – в изданиях, включенных в перечень изданий, рекомендованных ВАК), 1 в другом издании.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 118 страниц основного текста, список использованной литературы из 47 наименований на 5 страницах, 62 рисунка, 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, определена область исследований, сформулированы цель и задачи диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту, практическая ценность работы, отражены сведения о структуре работы.

В первой главе приведен обзор современного состояния инерциальных модулей интегрированных систем ориентации и навигации (ИСОИ). Рассмотрена общая структурная схема корабельной ИСОИ и способы формирования выходных данных измерительного блока.

Общая (традиционная) структурная схема корабельной ИСОИ представлена на рисунке 1.

ИСОИ построена на основе бескарданного инерциального измерительного модуля (БИИМ), который вырабатывает навигационные и динамические параметры (НП, ДП). В автономном режиме погрешности этих параметров растут во времени поэтому СНС, навигационная радиолокационная система (НРЛС), ЛАГ и электронная картографическая навигационно-информационная система (ЭКНИС) используются для коррекции полученных данных.

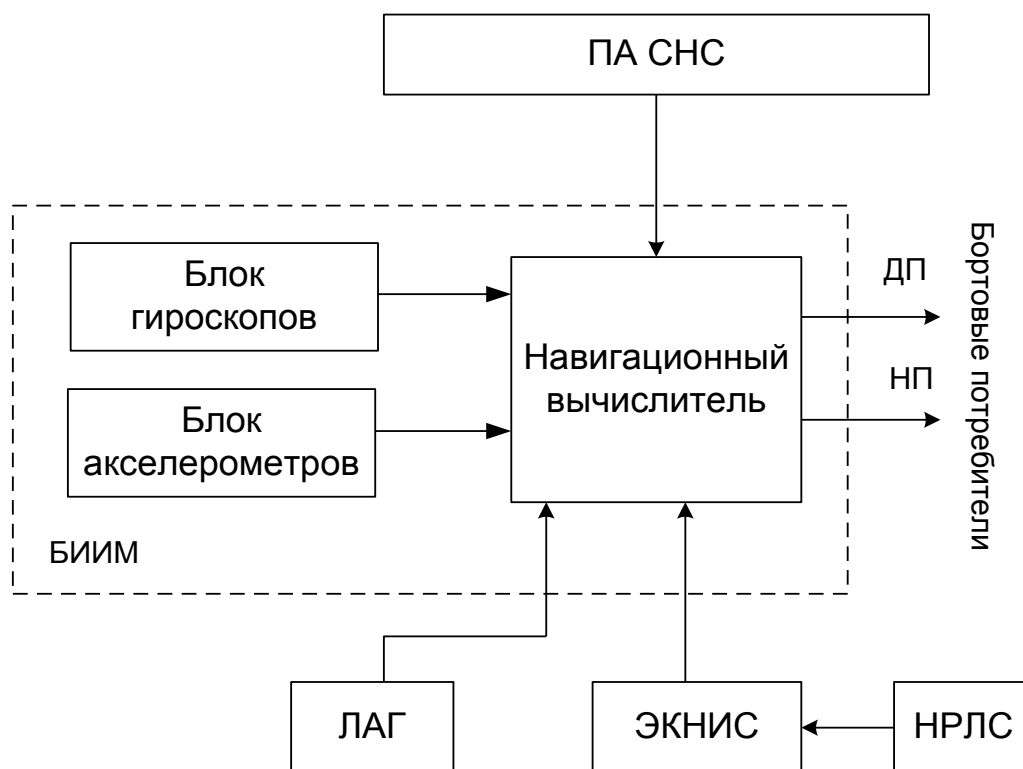


Рисунок 1 – Структурная схема корабельной ИСОН

Выполнен обзор современных образцов инерциальных модулей ИСОН, разработанных в ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". Показано, что данные системы ориентации могут решать поставленную перед системой управления задачу с высокой точностью. Однако экономическая эффективность такого решения для некоторых типов подвижных объектов вызывает необходимость проведения дополнительных исследований.

Целесообразно проведение исследований по разработке специализированной интегрированной системы ориентации для решения задачи управлением вертикальным движением СПК с ГПК.

Во второй главе выработаны требования к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов. Рассмотрены параметры изучаемого объекта (СПК) и интеллектуальная система управления движением СПК.

Введем основные системы координат, используемые для описания принципов построения систем ориентации:

- приборная система координат Ox_uz , ось Ox совпадает с продольной осью объекта и направлена к его носу, ось Oy направлена перпендикулярно плоскости палубы вверх, ось Oz совпадает с поперечной осью объекта (рисунок 2);
- географическая система координат $ONhE$, пространственно сориентированная своими осями, соответственно, на север, вертикаль и восток места;
- полусвязанная СК $Ox_g y_g z_g$, полученная поворотом системы координат $ONhE$ на угол курса K . (рисунок 3).

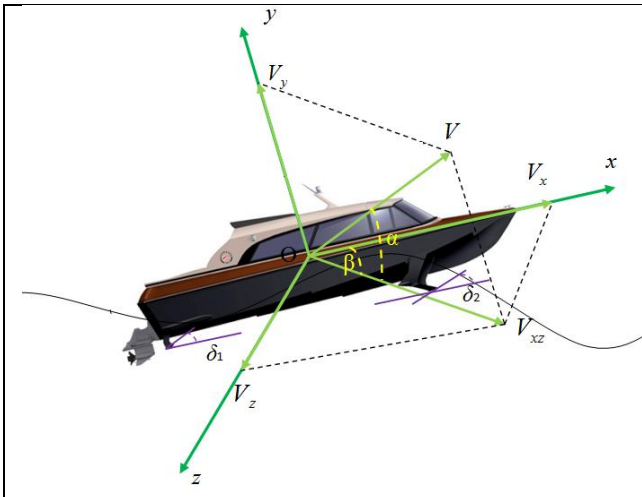


Рисунок 2 – Приборная система координат

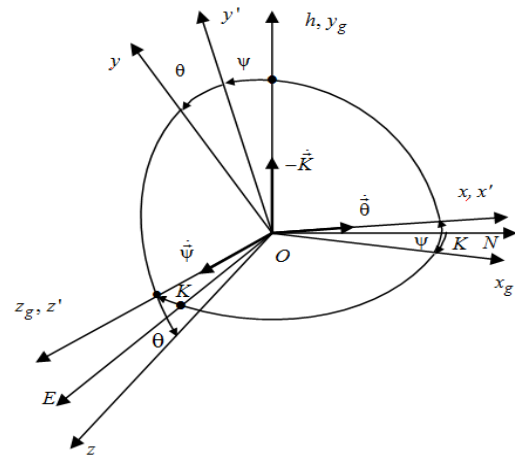


Рисунок 3 – Взаимное положение СК $Oxyz$, $ONhE$ и $Ox_g y_g z_g$.

Взаимное положение $Oxyz$ относительно географической СК $ONhE$ характеризуется углами курса K , дифферента ψ и крена θ . Характерными особенностями СПК с глубоко погруженными крыльями являются, во-первых, собственная неустойчивость в вертикальной плоскости, во-вторых, отсутствие волновых возмущений в крыльевом режиме. Синтез законов управления для СПК с глубоко погруженными крыльями подробно описан в [4]. Математическая модель системы управления СПК в работе рассматривалась в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_z \\ \alpha \\ \psi \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_z \\ \alpha \\ \psi \\ h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix},$$

где ω_z – угловая скорость килевой качки; α – угол атаки; ψ – угол дифферента; h – высота центра масс судна; δ_1, δ_2 – углы поворота закрылков носового и кормового крыльев; a_{ij}, b_{ij} – постоянные коэффициенты.

Результаты моделирования изменения высоты центра масс СПК приведены на рисунке 4 (1 – при измерениях без учета погрешностей, 2 – с учетом погрешностей). Моделирование показало, что система управления начинает терять устойчивость уже при небольших усредненных погрешностях координат. Найденное устойчивое движение, приведенное на рисунке 4, соответствует следующим погрешностям: 1' – для измерений углов; 1 мм – для измерения высоты центра масс. Очевидно, что проектирование автономной системы навигации и ориентации с такими точностными характеристиками окажется нерентабельным.

Экономическая эффективность требований по точности к измерительной системе приводит к необходимости использования динамически настраиваемых фильтров, например ОФК. Закон управления в этом случае формируется по вектору оценки состояния. Для достижения наблюдаемости системы достаточно измерять только высоту центра масс СПК. Поэтому при моделировании сравнивались два варианта реализации схемы оценки с использованием ОФК. Результаты моделирования приведены на рисунке 5. Для кривой 1 вектор оценок переменных состояния восстановлен по из-

мерениям высоты центра масс СПК. Кривая 2 – это результат моделирования движения системы по фильтрованным оценкам при измерении полного вектора состояния.

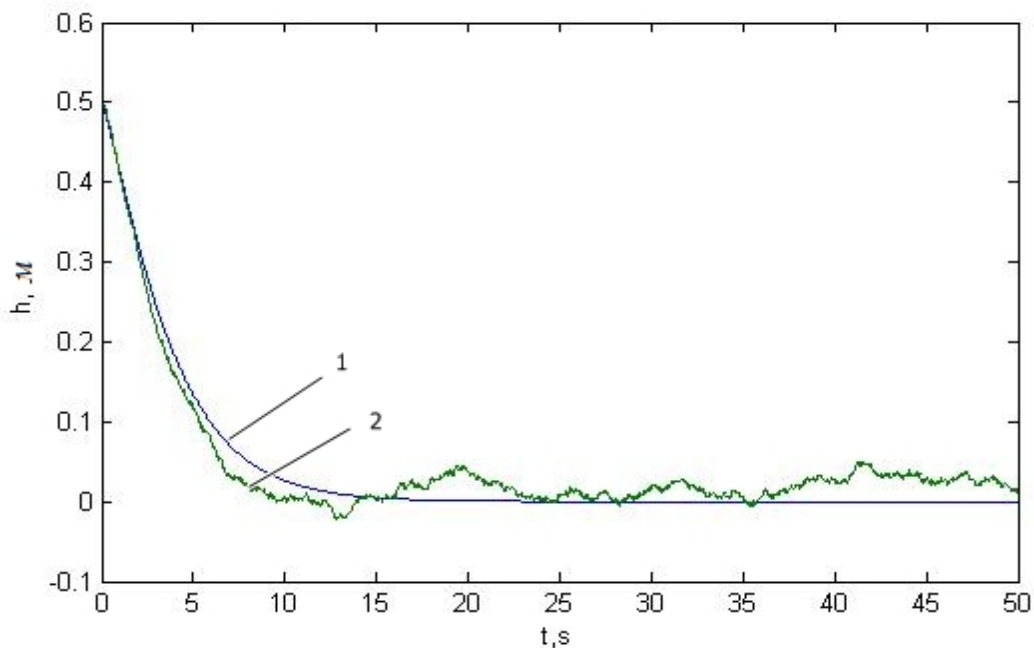


Рисунок 4 – Моделирование изменения высоты центра масс судна

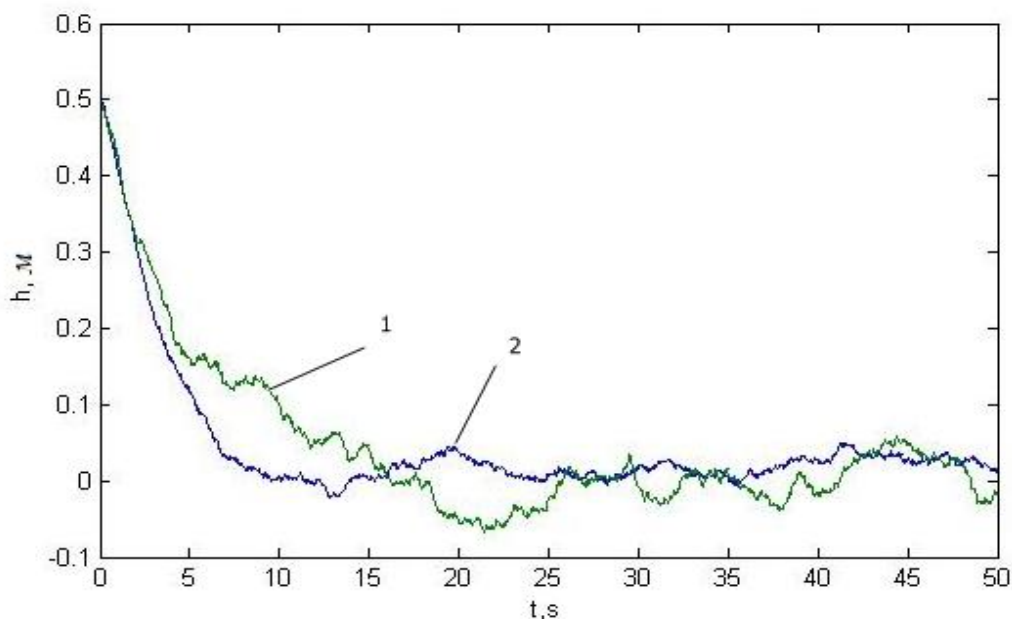


Рисунок 5 – Результаты моделирования высоты центра масс с использованием ОФК

Результаты моделирования демонстрируют, что при измерении и фильтрации полного вектора состояния достигается лучшее качество динамики. Требования к средствам измерения по точности удается снизить.

Обеспечение устойчивой работы системы управления СПК выполняется при организации измерений кинематических параметров управления движением с привлечением динамически настраиваемых фильтров. Данная система управления СПК требует обеспечения следующих предельных погрешностей измерения *кинематических параметров управления движением*:

- по угловой скорости килевой качки, $\pm 0,1^\circ/\text{с}$;

- по углам атаки и дифферента, $\pm 0,5^\circ$;
- по высоте центра масс, $\pm 0,1$ м.

Выработанные требования к системе ориентации позволяют полагать, что для их обеспечения в составе инерциального модуля целесообразно использовать интенсивно развивающиеся волоконно-оптические и микромеханические датчики [4]. Исходя из технических характеристик СПК с ГПК и условий эксплуатации, показана возможность использования математической модели системы управления. Проанализирована целесообразность выполнения измерений параметров модели с использованием ОФК для обеспечения возможности снижения требований к точности системы ориентации.

В третьей главе разработана структура специализированной гировертикали для решения задачи управления движением СПК с ГПК. Разработан алгоритм гировертикали, позволяющий сформировать вектор измерений кинематических параметров системы управления, а также выполнить анализ ее точностных характеристик. При этом точности датчиков гировертикали определены требованиями точности кинематических параметров управления движением.

Алгоритм выработки кинематических параметров движения судна.

Особенностью предлагаемой в работе системы ориентации является то, что в ее составе используется только один ДУС, чувствительная ось которого расположена по поперечной оси объекта. ДУС контролирует угол килевой качки, точность которого в значительной степени определяет точность выработки углов дифферента и атаки – двух из интересующих параметров управления движением.

Показания z -гироскопа ω_z и триады акселерометров, учитывая динамические характеристики рассматриваемого СПК, могут быть описаны следующими (упрощенными) выражениями [5]:

$$\omega_z = \dot{\psi} \cos \theta + \dot{K} \sin \theta \cos \psi \quad (1)$$

$$W_x = g \sin \psi + \dot{V}_x;$$

$$W_y = g \cos \psi \cos \theta + \dot{V}_y + \dot{K} V_{x_g} \cos \psi \sin \theta;$$

$$W_z = -g \cos \psi \sin \theta + \dot{V}_z + \dot{K} V_{x_g} \cos \psi \cos \theta;$$

$$\dot{K} = \frac{M_{z_g} \dot{M}_{x_g} - \dot{M}_{z_g} M_{x_g}}{M_{x_g}^2 + M_{z_g}^2},$$

где: $\dot{K} V_{x_g}$ – центростремительное ускорение, порождаемое угловой скоростью изменения курса на циркуляции \dot{K} и проекцией линейной скорости V_x на продольную ось Ox связанной системы координат; $\dot{K} \sin \theta \cos \psi$ – вклад, так называемой «перекрестной связи» в показания гироскопа; $\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z$ – составляющие линейного ускорения по осям СК $Oxyz$; M_{x_g}, M_{z_g} – проекции показаний магнитометров на оси горизонтальной географической системы координат связанной с курсом [3].

Скорость изменения угла дифферента вычисляется из (1):

$$\dot{\psi} = \frac{1}{\cos \theta} \omega_z - \dot{K} \tan \theta \cos \psi, \quad (2)$$

тогда: $\psi = \psi(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{\psi} dt,$

где $\psi(t_0)$ – угол дифферента, полученный в режиме начальной выставки.

Крен определяется по показаниям z -акселерометра:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{W_z - \dot{K}V_{x_g} \cos \theta}{-g \cos \psi}\right);$$

и угол атаки:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{V_y}{V}\right),$$

где: V и V_y – линейная скорость судна и проекция ее вектора на ось Oy .

Проекции вектора кажущегося ускорения на оси системы координат $ONhE$:

$$n_{NhE} = CW_{xyz}, \quad (3)$$

где: $C = C_K \cdot C_\psi \cdot C_\theta$ – матрица перехода СК $Oxyz$ к $ONhE$ (рисунок 3) [2], [5].

Составляющие относительного ускорения движения объекта получены компенсацией «вредных» ускорений из кажущегося ускорения, измеряемого акселерометрами:

$$\dot{V}_{NhE} = n_{NhE} - a_{NhE}^k, \quad (4)$$

где составляющие a_{NhE}^k определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} a_E^k &= V_h (2\Omega + \dot{\lambda}) \cos \varphi - V_N (2\Omega + \dot{\lambda}) \sin \varphi, \\ a_N^k &= V_E (2\Omega + \dot{\lambda}) \sin \varphi + V_h \dot{\varphi}, \\ a_h^k &= g - V_E (2\Omega + \dot{\lambda}) \cos \varphi - V_N \dot{\varphi}, \end{aligned} \quad (5)$$

а Ω, λ, φ – скорость суточного вращения Земли, долгота и широта местоположения судна, соответственно.

Вышеперечисленные уравнения описывают навигационный алгоритм, позволяющий определить скорость и координаты местоположения объекта. При использовании только инерциальных датчиков, погрешности определения этих параметров будут накапливаться со временем. Для устранения этого накопления была применена схема комплексирования данных с использованием ОФК.

Структурная схема комплексирования представлена на рисунке 6.

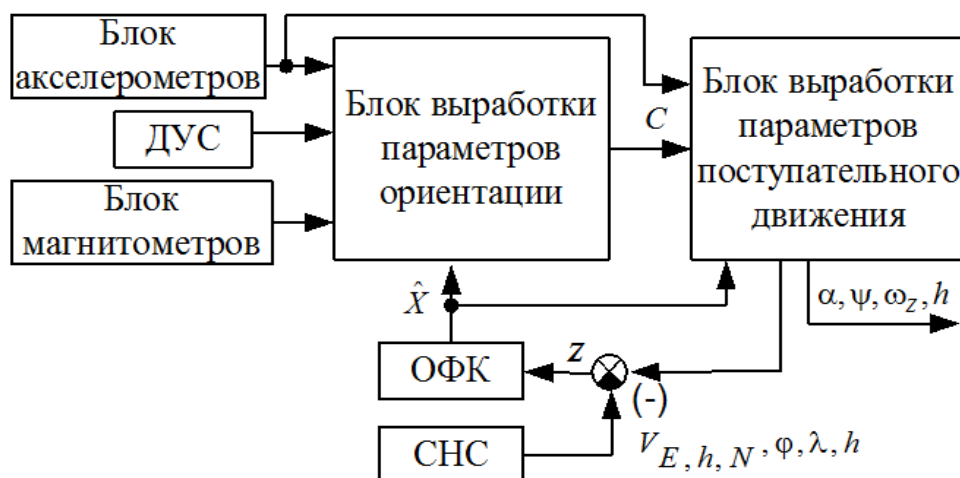


Рисунок 6 – Структурная схема комплексирования

Расчетная модель ошибок системы имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F(t)X(t) + G(t)w(t), \\ z(t) &= H(t)X(t) + v(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где: $F(t), G(t)$ – матрицы состояния и возмущения; $H(t), v(t)$ – матрица измерения и вектор ошибки измерения; $w(t) = [\Delta\omega_z^\Phi \quad \Delta W_x^\Phi \quad \Delta W_y^\Phi \quad \Delta W_z^\Phi \quad \xi_{\omega_z} \quad \xi_{W_x} \quad \xi_{W_y} \quad \xi_{W_z}]^T$ – вектор возмущения, а вектор состояния

$$X = \left[\Delta K \quad \Delta\psi \quad \Delta\theta \quad \Delta V_N \quad \Delta V_h \quad \Delta V_E \quad \Delta\varphi \quad \Delta h \quad \Delta\lambda \quad \Delta\bar{\omega}_z \quad \Delta\bar{W}_x \quad \Delta\bar{W}_y \quad \Delta\bar{W}_z \right]^T.$$

Расчетная модель ошибок системы получена варьированием уравнений (2), (4). При этом, учитывая требования к точности выработки кинематических параметров управления движением, составляющие «вредных» ускорений могут быть опущены.

$$\Delta\dot{\psi} = \frac{1}{\cos\theta} \Delta\omega_z + \sin\psi tg\theta \dot{K} \Delta\psi - (\cos\psi \dot{K} - tg\theta \dot{\psi}) \Delta\theta;$$

$\Delta\dot{V}_{NhE} = \Delta C W_{xyz} + C \Delta W_{xyz}$, которое может быть представлено следующим образом:

$$\Delta\dot{V}_{NhE} = B W_{xyz} \Delta K + D W_{xyz} \Delta\psi + E W_{xyz} \Delta\theta + C \Delta W_{xyz}, \text{ где } B \Delta K + D \Delta\psi + E \Delta\theta = \Delta C,$$

$B = C'_K \cdot C'_\psi \cdot C'_\theta$; $D = C_K \cdot C'_\psi \cdot C'_\theta$; $E = C_K \cdot C_\psi \cdot C'_\theta$; где C'_K, C'_ψ, C'_θ – частные производные по K, ψ, θ соответственно.

$$\Delta\dot{\varphi} = \frac{1}{R} \Delta V_N; \Delta\dot{h} = \Delta V_h; \Delta\dot{\lambda} = \frac{1}{R \cos\varphi} \Delta V_E.$$

Полученные уравнения ошибок и требования к точности определения кинематических параметров системы управления позволяют определить требования к точностным характеристикам чувствительных элементов гировертикали и подсистем ИСОН (см. таблицу 1):

Таблица 1 – Требования к точности датчиков

Датчики	Погрешность	
	Систематическая составляющая	Случайная составляющая (СКО)
z- гироскоп	30 ‰	3 ‰
x- и z- акселерометры	$2 \cdot 10^{-3} g$	$2 \cdot 10^{-4} g$
y- акселерометр	$5 \cdot 10^{-4} g$	$5 \cdot 10^{-5} g$
Скоростные измерения СНС		0,3 м/с
Позиционные измерения СНС		50 м

Учитывая относительно низкие требования к точности датчиков, можно предложить комплектовать систему датчиками разного класса точности. Тогда в качестве ДУС можно использовать, например, волоконно-оптический гироскоп, акселерометры по осям x, z – микромеханические и по оси y – макроакселерометр.

Алгоритм гировертикали для определения кинематических параметров системы управления СПК представлен на рисунке 7.

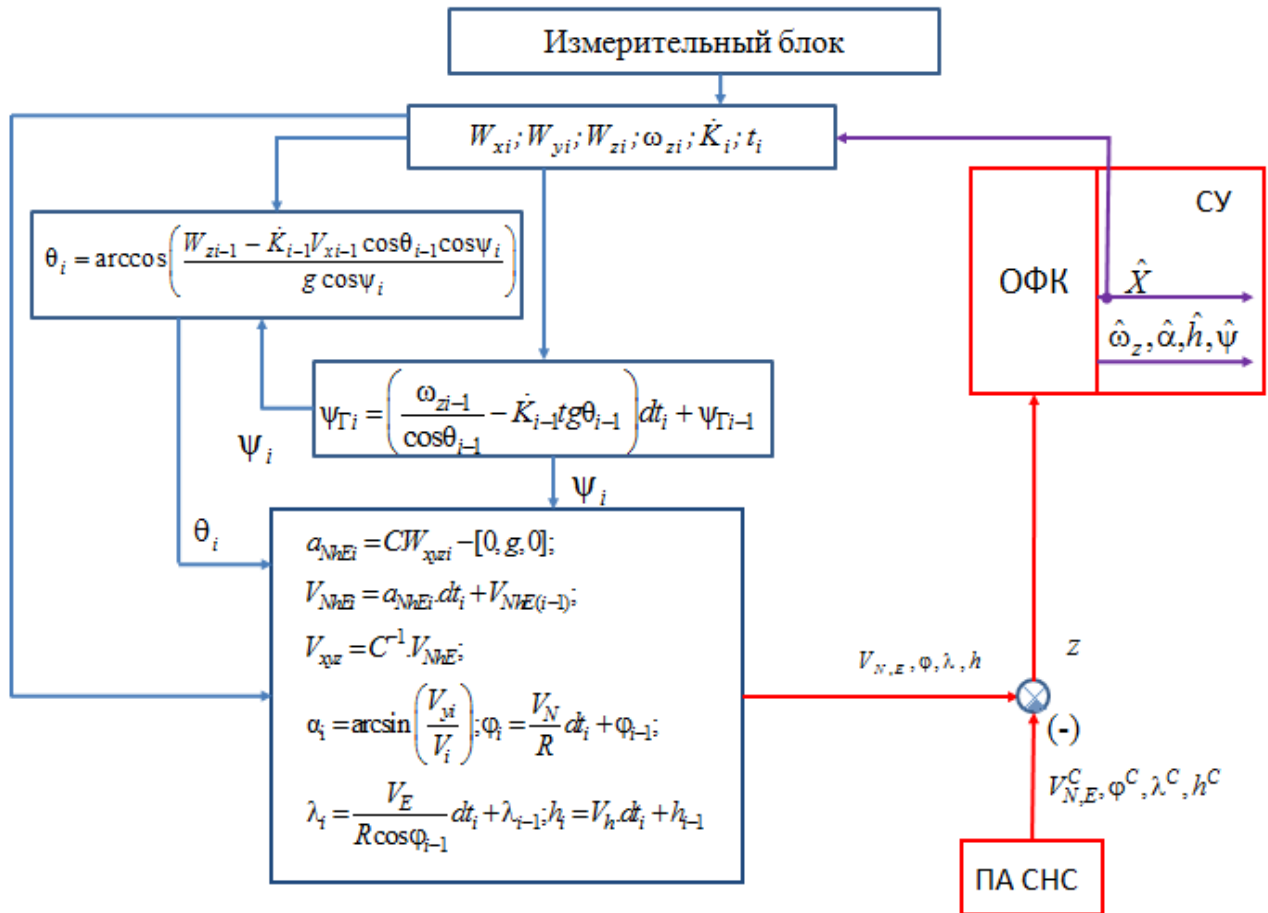


Рисунок 7 – Алгоритм гировертикали

Модели погрешностей ДУС и акселерометров: смещения нулей гироскопа $\Delta\bar{\omega}_z$ и акселерометров $\Delta\bar{W}_i$ и их изменчивость в пуске аппроксимированы соответствующими винеровскими процессами:

$$\Delta\omega_z = \Delta\bar{\omega}_z + \Delta\omega_z^\phi,$$

$$\Delta\dot{\bar{\omega}}_z = \sqrt{Q_{\Delta\bar{\omega}_z}} \cdot \xi_{\Delta\bar{\omega}_z}(t), \Delta\bar{\omega}_z(t_0);$$

$$\Delta W_i = \Delta\bar{W}_i + \Delta W_i^\phi, i = x, y, z,$$

$$\Delta\dot{\bar{W}}_i = \sqrt{Q_{\Delta\bar{W}_i}} \cdot \xi_{\Delta\bar{W}_i}(t), \Delta\bar{W}_i(t_0).$$

Ненулевые элементы матрицы состояния $F(13 \times 13)$ из уравнения (6):

$$f_{2,2} = \sin\psi tg\theta \dot{K}; f_{2,3} = -(\cos\psi \dot{K} - tg\theta \dot{\psi}); f_{2,10} = \frac{1}{\cos\theta};$$

$$f_{4,1} = b_{11}W_x + b_{12}W_y + b_{13}W_z; f_{4,2} = d_{11}W_x + d_{12}W_y + d_{13}W_z; f_{4,3} = e_{11}W_x + e_{12}W_y + e_{13}W_z;$$

$$f_{4,11} = c_{11}; f_{4,12} = c_{12}; f_{4,13} = c_{13};$$

$$f_{5,1} = b_{21}W_x + b_{22}W_y + b_{23}W_z; f_{5,2} = d_{21}W_x + d_{22}W_y + d_{23}W_z; f_{5,3} = e_{21}W_x + e_{22}W_y + e_{23}W_z;$$

$$f_{5,11} = c_{21}; f_{5,12} = c_{22}; f_{5,13} = c_{23};$$

$$f_{6,1} = b_{31}W_x + b_{32}W_y + b_{33}W_z; f_{6,2} = d_{31}W_x + d_{32}W_y + d_{33}W_z; f_{6,3} = e_{31}W_x + e_{32}W_y + e_{33}W_z;$$

$$f_{6,11} = c_{31}; f_{6,12} = c_{32}; f_{6,13} = c_{33};$$

$$f_{7,4} = \frac{1}{R}; f_{8,5} = 1; f_{9,6} = \frac{1}{R \cos\varphi},$$

где $b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}, e_{ij}$ – элементы матриц B, C, D, E , соответственно.

Ненулевые коэффициенты матрицы возмущения $G(13 \times 8)$:

$$G_{1,1} = \frac{1}{\cos\theta}; G_{4,2} = c_{11}; G_{4,3} = c_{12}; G_{4,4} = c_{13}; G_{5,2} = c_{21}; G_{5,3} = c_{22}; G_{5,4} = c_{23};$$

$$G_{6,2} = c_{31}; G_{6,3} = c_{32}; G_{6,4} = c_{33}; G_{10,5} = \sqrt{Q_{\Delta\dot{\omega}_z}}; G_{11,6} = \sqrt{Q_{\Delta\dot{W}_x}}; G_{12,7} = \sqrt{Q_{\Delta\dot{W}_y}};$$

$$G_{13,8} = \sqrt{Q_{\Delta\dot{W}_z}}.$$

Разностные измерения:

- скоростные измерения по данным СНС:

$$z_{V_N}(t_{k+1}) = V_N^u(t_{k+1}) - V_N^{CHC}(t_{k+1}) = \Delta V_N(t_{k+1}) - v_{V_N^{CHC}}(t_{k+1}),$$

$$z_{V_E}(t_{k+1}) = V_E^u(t_{k+1}) - V_E^{CHC}(t_{k+1}) = \Delta V_E(t_{k+1}) - v_{V_E^{CHC}}(t_{k+1}).$$

Здесь индексы « u » и « CHC » означают параметры, вырабатываемые по данным инерциальной системы (гировертикали) и спутниковой навигационной системы.

- позиционные измерения по данным СНС:

$$z_{\varphi}(t_{k+1}) = \varphi^u(t_{k+1}) - \varphi^{CHC}(t_{k+1}) = \Delta\varphi(t_{k+1}) + v_{\varphi}(t_{k+1}),$$

$$z_h(t_{k+1}) = h^u(t_{k+1}) - h^{CHC}(t_{k+1}) = \Delta h(t_{k+1}) + v_h(t_{k+1}),$$

$$z_{\lambda}(t_{k+1}) = \lambda^u(t_{k+1}) - \lambda^{CHC}(t_{k+1}) = \Delta\lambda(t_{k+1}) + v_{\lambda}(t_{k+1}).$$

Вектор измерения: $z = [z_{V_N} \quad z_{V_E} \quad z_{\varphi} \quad z_h \quad z_{\lambda}]^T$.

Матрица измерения:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

При варьировании (5), с учетом $V^2 = V_N^2 + V_h^2 + V_E^2$ и $V_{xyz} = C^{-1}V_{NHE}$, получено:

$$\Delta\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_y}{V}\right)^2}} \Delta\left(\frac{V_y}{V}\right) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V_y}{V}\right)^2}} \frac{V\Delta V_y - V_y\Delta V}{V^2} = \frac{V\Delta V_y - V_y\Delta V}{V\sqrt{V^2 - V_y^2}}$$

$$= a_1\Delta K + a_2\Delta\psi + a_3\Delta\theta + a_4\Delta V_N + a_5\Delta V_h + a_6\Delta V_E.$$

Тогда, максимальная дисперсия ошибки в определении угла атаки определяется как сумма максимальных дисперсий:

$$P_{\Delta\alpha} = a_1^2 P_{\Delta K} + a_2^2 P_{\Delta\psi} + a_3^2 P_{\Delta\theta} + a_4^2 P_{\Delta V_N} + a_5^2 P_{\Delta V_h} + a_6^2 P_{\Delta V_E} = 0,0025.$$

В четвертой главе приведен анализ погрешностей интегрированной системы ориентации для стабилизации вертикального движения СПК. Разработано программное обеспечение для имитационного моделирования интегрированной системы ориентации, построенной на базе предложенной в 3-ей главе гировертикали и приемной аппаратуры сигналов СНС. По имитационным данным исследована точность такой системы (в среде Matlab).

При имитации движения судна с кинематическими параметрами, представленными на рисунках 8 – 9 (продольная скорость, курс), были получены результаты, приведенные на рисунках 10 – 15.

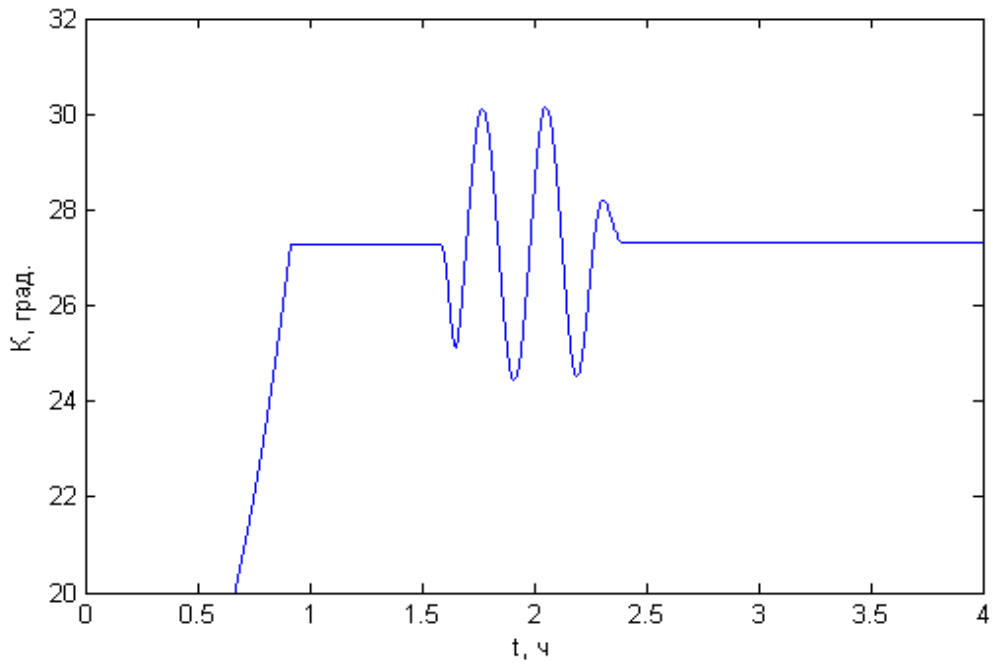


Рисунок 8 – Курс объекта

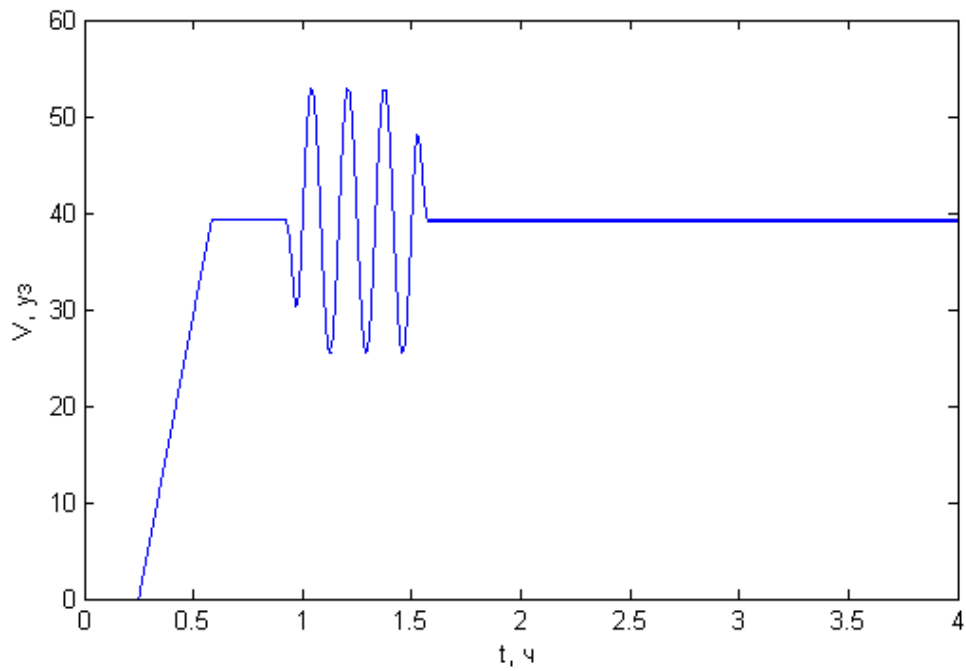


Рисунок 9 – Скорость объекта

Оценки систематических составляющих смещений нулей гироскопа и акселерометров приведены на рисунках 10 – 11, а на рисунке 12 – ковариационный канал ОФК:

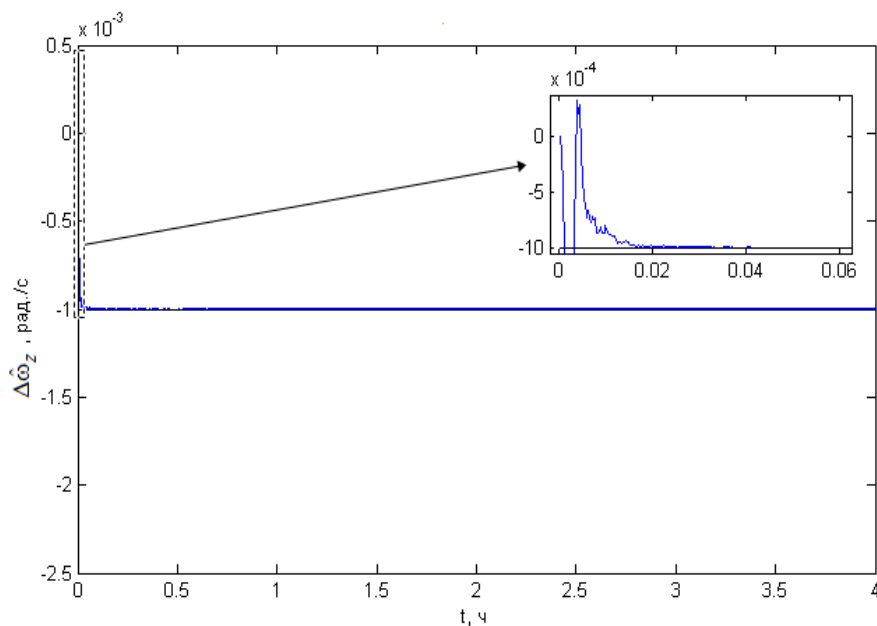


Рисунок 10 – Оценки систематических смещений нулей ДУС

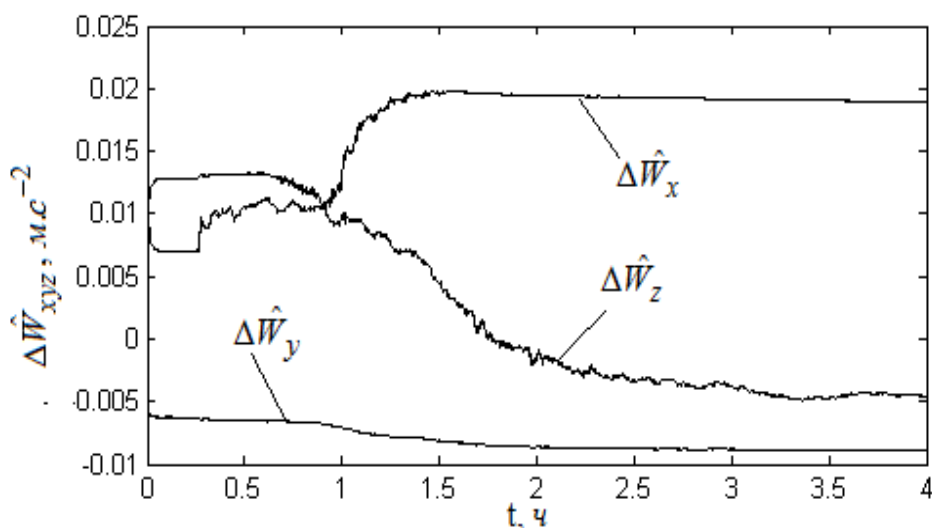


Рисунок 11 – Оценки систематических смещений нулей акселерометров

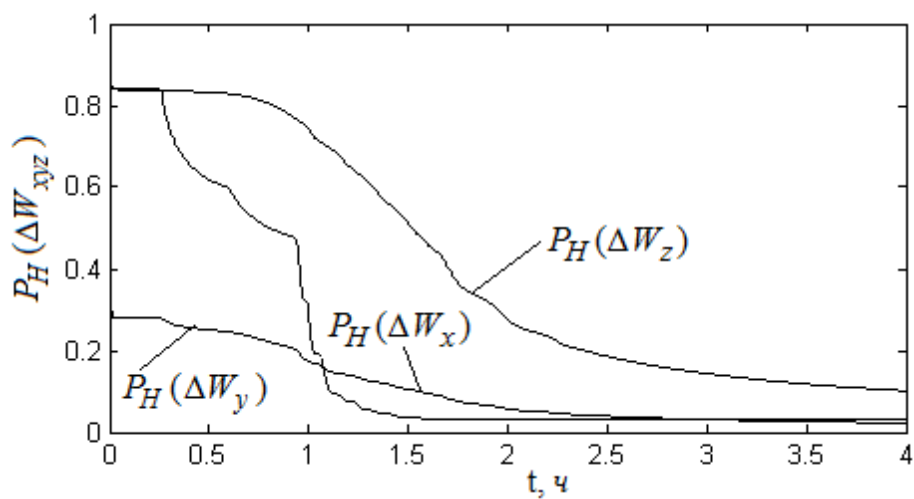


Рисунок 12 – Ковариационный канал ОФК

Из графиков видно, что все систематические смещения нулей датчиков наблюдаемы.

Рисунки 13 – 15 показывают средние квадратичные отклонения оценок искомых кинематических параметров управления движением: угла дифферента, высоты центра масс и угла атаки, соответственно.

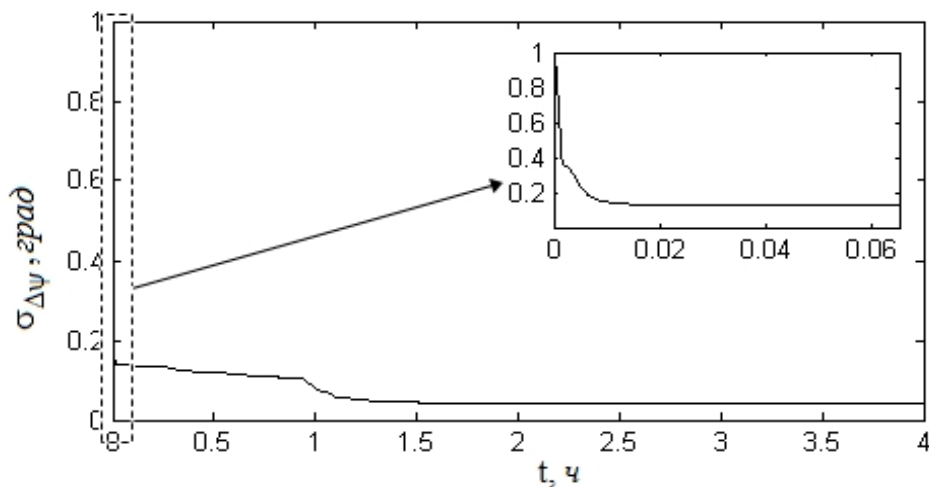


Рисунок 13 – Средние квадратичные отклонения оценок угла дифферента

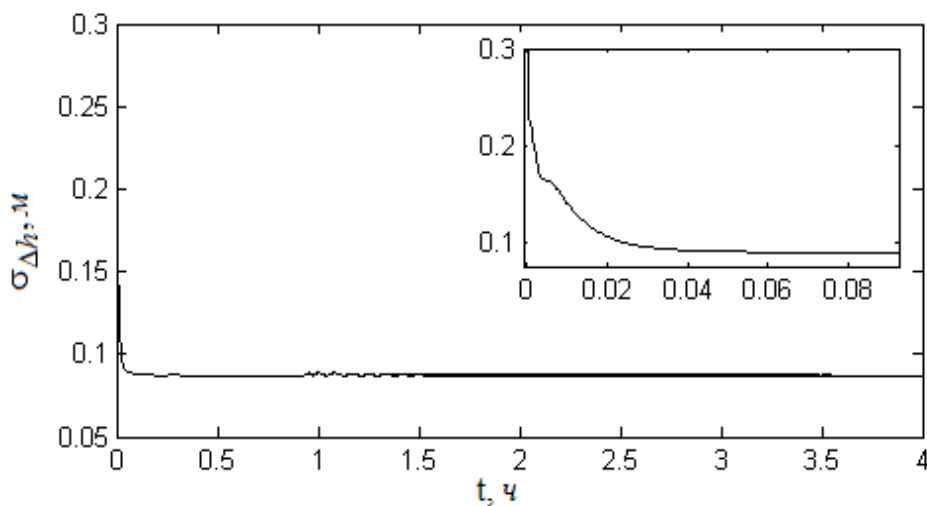


Рисунок 14 – Средние квадратичные отклонения оценок высоты центра масс

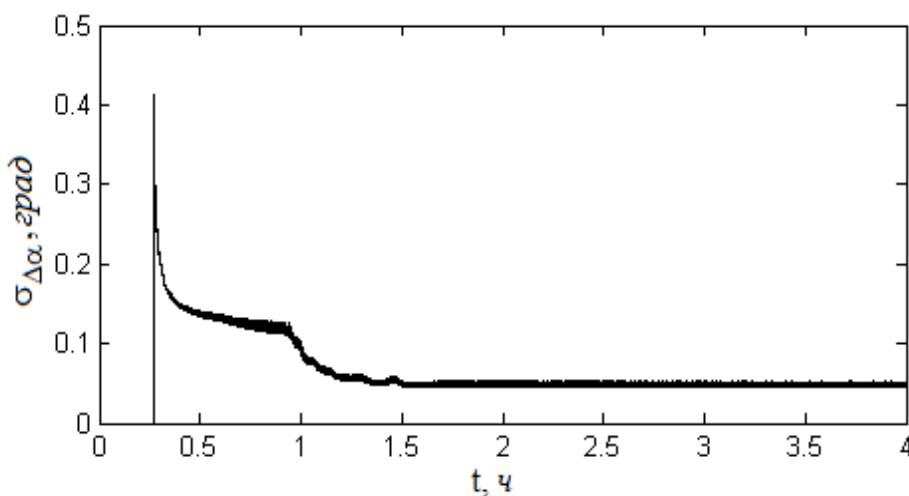


Рисунок 15 – Средние квадратичные отклонения оценок угла атаки

Из графиков видно, что требования к точности их определения, сформулированные во второй главе, выполнены.

Анализ результатов моделирования показал, что гировертикаль, построенная на одном ДУС и триадах магнитометров и микроакселерометров, в составе предложенной интегрированной системы ориентации, позволяет обеспечить требуемую точность измерения кинематических параметров управления движением СПК с ГПК – все систематические смещения нулей датчиков наблюдаемы.

Заключения

1. Рассмотрены характеристики изучаемого объекта – судно на подводных крыльях, общая структурная схема построения ИСОН и способы формирования выходных данных измерительного блока.

2. Сформулированы требования к точности измерения кинематических параметров системы управления движением СПК.

- по угловой скорости килевой качки: $\pm 0,1^\circ/\text{с}$;

- по углам атаки и дифферента: $\pm 0,5^\circ$;

- по высоте центра масс: 0,1 м.

3. Разработан алгоритм работы интегрированной навигационной системы – гировертикали – для решения задачи управления движением.

4. Моделирование показало, что гировертикаль для задачи управления может быть построена на ДУС и трех акселерометрах и может обеспечить требуемую точность измерения кинематических параметров управления движением.

Таким образом, разработана интегрированная система ориентации, обеспечивающая с требуемой точностью оценку кинематических параметров системы управления вертикальным движением СПК с ГПК.

Цитированная литература

1. Лукомский Ю. А., Корчанов В.М. Управление морскими подвижными объектами. СПб.: Элмор, 1996.

2. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В. В. Матвеев, В. Я. Распапов/ Под общ.ред. д.т.н. В. Я. Распапов–СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с. ISBN 978-5-900780-73-3

3. Анучин О.Н., Емельянцева Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / Под общ.ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 390 с.

4. Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов Навигация и управление движением судов. Учебник. - СПб.: «Элмор», 2002. - 360 с.

5. Гупалов В.И., Мочалов А.В., Боронахин А.М. Инерциальные методы и средства определения параметров движения объектов и свойств рельсового пути: Учеб. Пособие– СПб.: Изд-воСПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 144с.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Чан Т. Д., Боронахин А. М., Ха Мань Тханг, Лукомский Ю. А., Шпекторов А. Г., Гировертикаль для задач управления движением скоростного судна // Известия, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012 №4 С.75-80.

2. Чан Т. Д., Ха Мань Тханг, Лукомский Ю. А., Шпекторов А. Г., Боронахин А. М., Обоснование требований к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов // Известия, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012 №2 С.77-88.

3. Чан Танг Дык, Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг, Оптимизация алгоритмов инерциальной навигационной системы надводных объектов// Известия, СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014 №4 С.58-62.

Другие публикации:

1. Чан Танг Дык, Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг. Системы навигации в задачах управления движением надводными объектами// 66-я научно-техническая конференция профессорско-преподавательского состава университета, СПбЭТУ «ЛЭТИ» 2013, Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых, 1-8 февраля 2013 г. Санкт Петербург. С. 208-212.