На правах рукописи

Sy

Гурман Дмитрий Александрович

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В БАЗОВОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Специальности: 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления» и 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Ульяновск – 2013

Работа выполнена на кафедре «Телекоммуникации» Ульяновского государственного технического университета.

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор, Васильев Константин Константинович
Официальные оппоненты:	Крашенинников Виктор Ростиславович, доктор технических наук, профессор, УлГТУ, кафедра «Прикладная математика и информатика», зав. кафедрой
	Капитанчук Василий Вячеславович,
	кандидат технических наук, доцент,
	УВАУ ГА (И), кафедра информатики, доцент кафедры

Ведущая организация: ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», г. Ульяновск

Защита диссертации состоится «<u>25</u>» <u>декабря</u> 2013 г. в <u>12</u> часов <u>00</u> минут на заседании диссертационного совета Д 212.277.01 при Ульяновском государственном техническом университете по адресу: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32 (ауд. 211, Главный корпус).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного технического университета.

- Ch

Автореферат разослан <u>«18» ноября 2013 г.</u>

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, профессор

Смирнов Виталий Иванович

Актуальность темы. В последние годы для исследования мирового океана и проведения разнообразных подводных работ все шире используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА). При выполнении ряда миссий АНПА должны проходить под водой значительные расстояния с малыми отклонениями от заданной траектории движения при отсутствии радиотехнических средств определения абсолютных координат.

В связи с этим для обеспечения необходимой точности навигационных систем применяется комплексирование различных автономных датчиков ускорений и скорости. Управление АНПА обычно осуществляется на основе определения рассогласования между оценками и заданными значениями параметров движения в связанной с АНПА системе координат (СК) с последующим использованием пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора. При прямолинейном характере движения такой подход позволил создать высокоэффективные системы автоматического управления движением (САУД).

Однако для сложных криволинейных заданных траекторий движения такой подход приводит к значительным трудностям. Эти трудности связаны с тем, что траектория движения задается в базовой СК, и для управления АНПА в связанной СК необходимо разбить заданную траекторию движения на приближенно прямолинейные участки. Переход на очередной участок представляет собой сложный маневр, требующий задания определенных коэффициентов ПИД-регулятора. Понятно, что при сложной траектории движения и большем числе аппроксимирующих отрезков прямых требуется подготовка миссии И большой объем памяти бортового длительная вычислительного устройства. Ситуация становится еще более сложной, если необходимо внести изменения в заданную траекторию движения в ходе выполнения миссии.

Одним из возможных способов решения возникшей задачи является преобразование уравнений движения и определение управляющих воздействий в базовой СК. Однако в настоящее время известны лишь отдельные научные работы, в которых такой способ применяется для управления подводными кораблями и морскими подвижными комплексами. При этом удается повысить точность САУД в режимах динамического позиционирования и при движении по заданному маршруту. Вместе с тем применительно к задачам управления АНПА в пространстве трех измерений с учетом специфики навигационных систем и особенностей элементов и устройств системы управления АНПА такая задача не рассматривалась. Поэтому поставленная в диссертации задача разработки и исследования САУД АНПА в базовой СК представляется актуальной.

Цели и задачи работы. Целью работы является поиск возможностей снижения погрешностей системы управления АНПА. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ известных методов и алгоритмов определения местоположения и управления АНПА различных типов.

2. Преобразовать математические модели движения АНПА в трехмерном пространстве из связанной в базовую СК.

3. На основе линеаризации и дискретизации по времени разработать алгоритмы квазиоптимального оценивания параметров и управления движением АНПА в базовой трехмерной СК.

4. Рассмотреть возможности нахождения аналитических оценок погрешностей местоположения АНПА при использовании навигационных датчиков различных типов.

5. Оценить перспективы использования изображений донных объектов для повышения точности движения АНПА по заданному маршруту.

6. Провести сравнительный анализ эффективности разработанных алгоритмов оценивания и управления с помощью численного моделирования на ЭВМ для различных заданных траекторий.

7. Разработать программный комплекс, позволяющий проводить исследования и практическую реализацию алгоритмов оценивания параметров и управления движением АНПА, учитывающий гидродинамические модели, модели движительно-двигательного рулевого комплекса (ДДРК), а также особенности навигационных средств.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались методы математического моделирования, теории оптимальной фильтрации и оптимального управления, теории вероятностей и математической статистики.

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты.

1. Разработаны математические модели движения АНПА в трехмерном пространстве в базовой СК. Показано, что предложенные модели на основе их линеаризации и дискретизации по времени можно применить для разработки алгоритмов оптимального оценивания и управления движением АНПА.

2. Синтезированы алгоритмы оптимального и квазиоптимального оценивания параметров и управления движением АНПА, которые могут непосредственно использоваться для заданных почти произвольных криволинейных траекторий движения.

3. Проведено исследование алгоритмов оценивания параметров движения АНПА по заданным траекториям для нескольких вариантов использования навигационных приборов с разными точностными характеристиками, которое позволило создать весьма представительные семейства зависимостей дисперсий ошибок оценивания от параметров навигационных приборов и условий движения.

4. Установлены возможности и рассчитаны конкретные зависимости снижения дисперсий ошибок местоопределения при использовании дополнительной информации о положении неподвижных донных объектов.

4

5. На основе математического моделирования установлено, что наибольший выигрыш в точности управления по сравнению с известными САУД АНПА наблюдается для траекторий, имеющих участки с резкими изменениями направления движения.

6. Разработан программный комплекс на языке C++ с использованием среды Visual Studio 2008, предназначенный для исследования и разработки перспективных САУД АНПА различных типов, конкретизировано для АНПА типа Клавесин.

Практическая ценность. Разработанный программный комплекс, позволяющий имитировать случайные внешние воздействия, навигационные датчики, а также двигательно-движительный рулевой комплекс АНПА, предоставляет разработчикам САУД возможность исследования и оптимизации алгоритмов управления движением различных АНПА. В приложении к диссертации имеется акт об использовании результатов диссертационной работы в производственной деятельности ФНПЦ ОАО «НПО «Марс».

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих НТК:

• Шестая Всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ) (Ульяновск, УлГТУ, 2009 г.);

• Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодежи «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации» (Ульяновск, УлГТУ, 2009 г.);

• Научно-техническая конференция «Интегрированные автоматизированные системы управления» (Ульяновск, ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», 2011 г.);

• LXVI научная сессия, посвященная Дню Радио (Москва, 2011 г.);

• Седьмая Всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ) (Ульяновск, УлГТУ, 2011 г.);

• XIV Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (Москва, 2012 г.);

• Восьмая Всероссийская научно-практическая конференция (с участием стран СНГ) (Ульяновск, УлГТУ, 2013 г.);

• ежегодные конференции профессорско-преподавательского состава Ульяновского государственного технического университета (2009-2013 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе две в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и приложений. Работа содержит 122 страницы машинописного текста, 36 рисунков и 3 таблицы.

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертационного исследования, определение целей и задач работы, аргументацию научной новизны и практической значимости полученных результатов, во введении дается краткое содержание диссертации по главам и структура диссертации.

В первой главе проведен обзор литературы по моделированию систем ΑΗΠΑ: управления движением рассмотрены основные источники навигационной информации и их математические модели наблюдений, алгоритмы сравнительный анализ различных видов основные И навигационной информации, комплексирования a также представлены математические модели движения АНПА.

Приведенный обзор современных систем управления АНПА показал, что реализация управления движением в них осуществляется в основном в связанной СК. Алгоритмы управления в базовой трехмерной СК с поддержанием требуемой скорости движения и времени прохождения определяющих точек исследованы недостаточно.

Таким образом, возникает необходимость создания алгоритмов комплексирования различных источников навигационной информации, а также системы управления движением АНПА в базовой СК.

Во второй главе проведен синтез и анализ алгоритмов оптимального оценивания и управления движением АНПА в базовой трехмерной СК. Задача управления в базовой СК возникает, прежде всего, из-за необходимости задания траекторий движения в этой системе. В настоящее время задача управления решается путем нахождения рассогласования относительно заданной траектории, затем рассогласование переводится в связанную систему координат и вырабатывается управление движением.

В связи с этим встает задача построения математической модели движения АНПА в базовой СК, синтеза оптимальных алгоритмов оценивания параметров и управления движением подводного аппарата, учитывающих модели движения и модели навигационных датчиков.

Пространственное движение АНПА в базовой СК описывается вектором с 12 кинематическими параметрами:

 $\overline{x}_{g} = (X_{g} \ Y_{g} \ Z_{g} \ \varphi \ \psi \ \theta \ V_{xg} \ V_{yg} \ V_{zg} \ \omega_{x} \ \omega_{y} \ \omega_{z})^{T}$, где X_{g}, Y_{g}, Z_{g} – координаты положения АНПА в базовой СК; φ, ψ, θ – углы Эйлера; V_{xg}, V_{yg}, V_{zg} – проекции вектора линейной скорости на оси базовой СК; $\omega_{x}, \omega_{y}, \omega_{z}$ – угловые скорости.

Для перехода от связанных СК к базовым используется уравнение связи:

$$\dot{\overline{x}}_g = J(x) \cdot \overline{v} ,$$

где \bar{x}_{g} – вектор положения и ориентации АНПА в базовой СК; \bar{v} – вектор проекций линейной и угловой скоростей АНПА на оси связанной СК; J(x) – известная матрица преобразований из связанной СК в базовую СК.

Изменение положения АНПА определяется скоростями движения:

$$\begin{cases} V_{xg} = V_x \cos\varphi \cos\psi + V_y (\sin\varphi \sin\theta - \cos\varphi \cos\theta \sin\psi) + \\ + V_z (\cos\theta \sin\varphi + \cos\varphi \sin\psi \sin\theta), \\ V_{zg} = -V_x \cos\psi \sin\varphi + V_y (\cos\varphi \sin\theta + \cos\theta \sin\varphi \sin\psi) + \\ + V_z (\cos\varphi \cos\theta - \sin\varphi \sin\psi \sin\theta), \\ V_{yg} = V_x \sin\psi + V_y \cos\psi \cos\theta - V_z \cos\psi \sin\theta. \end{cases}$$
(1)

Связь этих скоростей с управляющими воздействиями $u_x = \frac{F_x}{m_y}$, $u_{\omega_y} = \frac{M_y}{J_y}$, и

 $u_{\omega_z} = \frac{M_z}{J_z}$ определяется исходными уравнениями движения в связанной СК с учетом продифференцированных по времени уравнений (1).

Для решения полученных систем дифференциальных уравнений использовался метод Рунге-Кутта. Альтернативой этому методу может служить простой одношаговый метод интегрирования с фиксированным шагом. Но при этом возникают дополнительные ошибки, возникающие при решении систем нелинейных дифференциальных уравнений.

Линеаризованную систему уравнений для динамики АНПА в дискретном времени можно представить следующим образом:

$$\overline{x}_{gi} = A_{i-1}\overline{x}_{g(i-1)} + B_{i-1}\overline{u}_{i-1} + \overline{\xi}_{i-1},$$

где вектор состояния $\bar{x}_{gi} = \bar{x}_g(t_i)$; A_i – динамическая матрица состояний; B_i – матрица линеаризованных коэффициентов для исполнительных органов АНПА; \bar{u}_i – вектор сигналов управления, подаваемых на вход системы управления; $\bar{\xi}_i$ – гауссовский вектор случайных воздействий.

Требуемые траектории движения АНПА запишутся в следующем виде:

$$\overline{x}_{Ti} = A_{T(i-1)}\overline{x}_{T(i-1)} + \overline{\xi}_{T(i-1)},$$

где \bar{x}_{Ti} – вектор требуемых параметров движения АНПА; A_{Ti} – динамическая матрица состояний; $\bar{\xi}_{Ti}$ – гауссовский вектор с ковариационными матрицами \bar{V}_{Ti} , позволяющий учесть неопределенность траектории, возникающую, например, при сопровождении подводных движущихся объектов.

Основной задачей оптимального управления является минимизация следующего локального функционала качества:

$$I = M\left\{ \left(\overline{x}_{Ti} - \overline{x}_{gi}\right)^T Q\left(\overline{x}_{Ti} - \overline{x}_{gi}\right) + \sum_{k=1}^i \overline{u}_k^T K \overline{u}_k \right\}$$

где Q – весовая функция ошибок оценивания параметров движения АНПА; K – матрица, определяющая расход энергии на управление АНПА.

Известно, что для минимизации функционала необходимо сформировать сигналы управления:

$$\overline{u}_{i-1} = \left[K + B_{i-1}^T Q B_{i-1} \right]^{-1} B_{i-1}^T Q_1 \left[A_{T_i} \hat{\overline{x}}_{T(i-1)} - A_i \hat{\overline{x}}_{g(i-1)} \right],$$
где $Q_1 = \begin{bmatrix} Q & -Q \\ -Q & Q \end{bmatrix}.$

Наблюдения со всех навигационных датчиков могут быть записаны в виде:

$$\overline{z}_i = H_i \overline{x}_{gi} + \overline{\xi}_{Hi},$$

где $\overline{\xi}_{Hi}$, i = 1, 2, ... – гауссовские независимые случайные величины. Таким образом, для решения задач навигации и управления можно использовать стандартные уравнения Калмана.

Заметим, что при определенных условиях существует установившийся режим, для которого ковариационные матрицы ошибок оценивания P_i не зависят от времени. Для удобства введем следующие обозначения:

$$\delta_{x} = \frac{P_{x}}{V_{nx}}; \ \delta_{v} = \frac{P_{v_{x}}}{V_{nx}}; \ \delta_{\xi} = \frac{V_{\xi}}{V_{nx}}; \ \delta_{nv} = \frac{V_{nv_{x}}}{V_{nx}},$$

где P_x, P_{v_x} – дисперсии ошибок оценивания координаты и скорости; V_{ξ} – дисперсия случайных воздействий; V_{nx}, V_{nv_x} – дисперсия ошибок наблюдения координаты и скорости; $\delta_x, \delta_y, \delta_{\xi}, \delta_{nv}$ – соответствующие относительные значения дисперсий ошибок.

На рисунке 1 представлены зависимости относительной дисперсии ошибки оценивания координаты δ_x от параметров дисперсии случайных воздействий и уровня погрешности наблюдений скорости.

Рассмотрим предельные значения относительной дисперсии ошибки наблюдения скорости δ_{nv} . Когда δ_{nv} стремится к нулю, т.е. когда ошибки наблюдения скорости очень малы, то δ_x стремится к определенному значению, которое можно определить аналитически: $\delta_x = \sqrt{\delta_{nv}}$. Когда $\delta_{nv} \to \infty$, т.е. скорость не наблюдается, а измеряется только координата, δ_x также можно определить аналитически.

Аналогичным образом были рассмотрены зависимости относительной дисперсии ошибки оценивания скорости δ_v от параметров дисперсии случайных воздействий и уровня погрешности наблюдений скорости. Когда δ_{nv} стремится к нулю, т.е. когда ошибки наблюдения скорости очень малы, то δ_v стремится к δ_{nv} . Если же $\delta_{nv} \to \infty$, то δ_v можно определить аналитически.

Таким образом, установлена зависимость значений дисперсий ошибок оценивания от значения возмущающих воздействий для установившегося режима. Показано, что при относительной дисперсии гидродинамических возмущений в пределах от 0 до 0,05 относительная дисперсия ошибки

оценивания координаты лежит в пределах от 0 до 0,5, а относительная дисперсия ошибки оценивания скорости в пределах от 0 до 0,15 в зависимости от различных значений относительной дисперсии ошибки наблюдения скорости.



Рисунок 1 – График установившихся значений относительных дисперсий ошибок оценивания координаты

Для большинства АНПА, выполняющих длительные исследования, радиотехнические средства определения местоположения, например GPS или ГЛОНАСС, оказываются недоступными. При этом определение координат осуществляется на основании инерциальных навигационных средств (ИНС), доплеровских измерителей скорости относительно морского дна, глубиномеров различных типов и других автономных датчиков. Отсутствие датчиков абсолютных координат приводит к постоянному увеличению погрешностей при движении АНПА по заданному маршруту. Рассмотрим изменение СКО ошибок местоопределения для различных комбинаций и параметров датчиков.

На рисунке 2 построены зависимости СКО оценок координат подводного аппарата от пройденного пути при различных значениях ошибки наблюдения доплеровского лага и ИНС, работающих отдельно.

Анализ графиков показывает, что для случая измерения координат с использованием доплеровского лага при прохождении подводным аппаратом расстояния 20 км СКО оценивания координат лежат в пределах от 3 до 10 м.

Аналогичным образом было проведено исследование с использованием в качестве навигационных приборов только ИНС, в результате был сделан вывод, что при прохождении АНПА расстояния порядка 3 км СКО оценивания координат выходят за пределы 50 м, что недопустимо. В этом случае необходимо использовать другие навигационные источники.



Рисунок 2 – Графики зависимостей СКО ошибки оценивания координат от пройденного пути при разных значениях СКО ошибки наблюдения лага и ИНС

Отметим, что при комплексировании наблюдений доплеровского лага и ИНС, зависимости СКО ошибки оценивания координат от времени моделирования оказываются близкими к графикам для лага на рисунке 2. Таким образом, эффекта от использования наблюдений ИНС работающей совместно с доплеровским лагом практически нет.

Также были получены зависимости СКО оценивания координат подводного аппарата от случайных воздействий при различных значениях СКО наблюдения лага и ИНС, из которых следует, что при СКО случайных воздействий для лага – до $3 \cdot 10^{-8} \, M$, для ИНС – до $3 \cdot 10^{-7} \, M$ ошибки оценивания координат практически не зависят от ошибок наблюдений навигационных приборов. В случае, если СКО случайных воздействий находится в пределах: для лага – от $3 \cdot 10^{-8} \, M$ до $3 \cdot 10^{-5} \, M$, для ИНС – от $3 \cdot 10^{-7} \, M$ до $3 \cdot 10^{-5} \, M$ ошибка становится постоянной и практически не зависит СКО ошибка становится постоянной и практически не зависит от СКО случайных воздействий.

На точность определения координат АНПА, кроме случайных подводных возмущений, влияют многочисленные факторы. Например, при больших расстояниях до дна гидроакустический лаг может иметь низкую точность. Было проведено исследование точности оптимальных алгоритмов оценивания местоположения подводного аппарата при движении по заданным прямолинейным траекториям при временном пропадании наблюдений с различных навигационных датчиков. Исследование проводилось для времени

наблюдения 1 ч. Предполагалось, что при прохождении расстояния 2000 м пропадает измерение навигационного прибора. Зависимости СКО ошибок оценивания координат при различных сочетаниях погрешностей наблюдений лага и ИНС приведены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Ошибки оценивания координат

Анализ зависимостей показывает, что при пропадании наблюдений с датчика ИНС, при наличии наблюдений с доплеровского лага, ошибки практически не увеличиваются (кривая 1 отображает изменение ошибок совместного использования наблюдений ИНС и лага, а также использование наблюдений только лага). При отсутствии наблюдений доплеровского лага, использование ИНС приводит к уменьшению ошибок оценивания (кривые 3.1, 3.2) по отношению к случаю, когда пропадают наблюдения со всех навигационных источников (кривая 4). Кривая 2 отображает изменение ошибок случая. когда используются наблюдения только ИНС С начала для моделирования. Таким образом, применение ИНС обязательно при возможных нарушениях работы измерителя скорости.

Заметим, что при достаточно длительном времени движения АНПА и при отсутствии навигационных приборов, дающих абсолютные оценки координат, ошибки определения местоположения могут сильно возрастать. Снизить скорость возрастания этих ошибок можно, используя алгоритм одновременной локализации и картографирования (SLAM). Принцип действия алгоритма SLAM заключается в обнаружении объектов на морском дне в поле видимости АНПА, определении оценок координат этих объектов и последующем уточнении оценок собственных координат АНПА.

На рисунке 4 представлены зависимости ошибки определения координат для случая, когда АНПА перемещается по прямой линии на дистанции 1 км при СКО шума наблюдений лага $\sigma_{nV_{n}} = 0,1 \, M/c^2$ при разных значениях дисперсии шума наблюдений сонара Ds. На участке 0...450 м используется только алгоритм «по счислению пути» на основе измерений с помощью лага. На участке 450...550 м включается в работу алгоритм SLAM и позволяет ошибку позиционирования. Действительно, существенно снизить при измерениях расстояния до неподвижных объектов достаточно точных практически отсутствует рост величины ошибок при движении АНПА в зоне их расположения.



Рисунок 4 – Зависимости СКО ошибок оценивания координат от пройденного расстояния

<u>Оценка эффективности оптимального управления в базовой СК</u>. Была рассмотрена эффективность применения оптимального управления в базовой СК. Моделирование производилось для АНПА типа Клавесин с одним двигателем и двумя рулями, с учетом реальных гидродинамических моделей движения и обтекания жидкости, моделей ДДРК и навигационных средств.

Для решения задачи минимизации отклонения от заданной линии траектории в связанной СК использовался ПИД-регулятор, на каждом шаге находилось отклонение от курса и отклонение от траектории, которое переводилось в градусную поправку, и затем эта поправка, пересчитанная в электрические сигналы, подавалась на систему управления рулями.

На рисунках 5 и 6 представлены результаты моделирования в программной среде С++.

Траектория движения для разных вариантов управления показана на рисунке 5 (а, б), а на рисунке 6 (а, б) представлены значения абсолютных ошибок управления в связанной СК (сплошные линии) и оптимального управления в базовой СК (пунктир) для участка траектории, на котором АНПА выполняет поворот.



Рисунок 5 – Примеры прохождения по заданной траектории для двух алгоритмов



По результатам моделирования можно заметить, что на прямых участках траектории разные алгоритмы управления работают почти одинаково, и отклонения минимальны. Отличия проявляются в основном на участках, где

аппарат производит маневр. Видно, что при управлении в связанной СК при маневрах отклонения от заданной траектории могут быть значительными.

В третьей главе рассматривается задача программной и аппаратной реализации модели системы управления движением АНПА типа Клавесин. Программный комплекс представляет собой набор функциональных модулей, выполненных в виде отдельных исполняемых файлов и взаимодействующих между собой посредством сетевого протокола.

В функциональной структуре программного комплекса можно выделить следующие основные компоненты:

– визуализатор 3D-обстановки;

– блок контроля исполнения миссии;

– блок управления движением;

– блок навигации;

– блок комплексирования;

– блок SLAM.

Связь между блоками программного комплекса осуществляется через блок моделирования канала связи. С его помощью выполняется передача информации между исполняемыми модулями программы по принципу шины данных. Для этого у каждого блока имеются порты на передачу и прием информации, которые связаны с соответствующими портами других блоков через блок канала связи. В результате получается множество независимых информационных потоков между блоками, каждый из которых работает в отдельном программном потоке.

Визуализатор 3D-обстановки выполняет моделирование трехмерной сцены, в которой реализуется механизм подзагрузки рельефа дна по заранее созданным картам высот. Также визуализатор реализует моделирование движения объектов обстановки по заданным маршрутам и осуществляет контроль столкновения АНПА с объектами сцены.

Блок контроля исполнения миссии служит для контроля выполнения команд миссии, которые представляют собой указания для блока управления движением о требуемом изменении положения АНПА. В случае возникновения препятствий на пути движения АНПА, данный блок вырабатывает маршрут их обхода с целью продолжения движения АНПА по заданной траектории.

Блок управления движением отвечает за перемещение АНПА в указанные координаты и с заданным курсом. Данные координаты поступают от блока контроля исполнения миссии, который каждый раз ожидает от блока управления движением сигнала об окончании выполнения текущей команды.

Для определения координат текущего положения АНПА в пространстве используются навигационные устройства АНПА, которые реализуются в блоке навигации, затем, в блоке комплексирования строится оценка координат положения на основе сенсорной информации, полученной от блока навигации. Вычисленная оценка передается блоку управления движением и служит для определения достижения АНПА заданной координаты.

Блок SLAM служит для уточнения координат положения АНПА на основе текущих оценок собственных координат и координат характерных точек, наблюдаемых на рельефе местности.

Предполагается, что АНПА оснащен винтами регулируемого шага для создания вектора движения в продольном направлении, а также рулевым комплексом, предназначенном для изменения курса аппарата и управлением по высоте. Основным результатом вычислений блока имитации работы винта с регулируемым шагом является тяга T_E , а блока имитации работы рулевого комплекса – полезный момент M_R и паразитные силы X_R, Y_R .

Взаимодействие устройств в составе АНПА, их контроль и управление реализуются на программно-аппаратном уровне в составе локальной вычислительной сети. В общей структуре аппарата выделены базовые системы, обеспечивающие его функционирование как носителя аппаратуры (рисунок 7).



Рисунок 7 – Общая структура системы управления АНПА

Организующим ядром базовых систем является система программного управления, обеспечивающая управление движением. Для формирования управления используются набор пилотажных датчиков и эхолокационная система. Движение организуется с помощью движительно-рулевого комплекса. Дистанционное изменение миссии АНПА может осуществляться через гидроакустическую систему связи. Эта же система также используется для оперативного получения данных о текущем состоянии АНПА.

В главном окне моделирующего комплекса (рисунок 8) в графическом виде отображается движение АНПА, а также заданная траектория и оценка местоположения. Дополнительно отображаются мгновенные значения координат, углов и соответствующих скоростей.



Рисунок 8 – Главное окно моделирующего комплекса

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы.

1. Получены и исследованы математические модели движения АНПА в трехмерном пространстве в базовой СК.

2. Разработаны алгоритмы оптимального оценивания навигационных параметров и управления движением АНПА по различным траекториям, заданным в базовой СК.

3. Произведено исследование алгоритмов оценивания параметров движения АНПА, основанных на комплексировании разнородных датчиков. Рассчитаны и представлены семейства характеристик, позволяющие определить погрешности оценивания местоположения АНПА при сочетании датчиков различной точности.

4. Проанализировано применение алгоритмов одновременной локализации и картографирования с использованием линейного фильтра Калмана. Показано, при среднеквадратических погрешностях сонара ЧТО меньших 5 Μ предложенные алгоритмы позволяют существенно ошибку снизить местоопределения.

5. Применение разработанных алгоритмов в базовой СК позволяет обеспечить управление АНПА с очень малыми погрешностями даже при сложных криволинейных траекториях движения. Использование лучших из известных алгоритмов управления в этих же условиях приводит к ошибкам, составляющим единицы и десятки метров.

6. Разработан программный комплекс на языке C++ с использованием среды Visual Studio 2008, предназначенный для исследования и разработки перспективных систем автоматического управления движением АНПА типа Клавесин.

7. В ходе исследования была спроектирована и смоделирована система управления движением конкретным АНПА с учетом реальных гидродинамических сил сопротивления, рулей и гребных винтов.

В приложениях содержатся полный вид уравнений, описывающих динамику АНПА, формат структур передачи данных, а также акт об использовании результатов диссертационной работы в производственной деятельности ФНПЦ ОАО «НПО «Марс».

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях.

В изданиях из перечня ВАК:

1. Гурман, Д. А. Анализ эффективности систем навигации подвижных объектов с помощью имитационного моделирования / Д. А. Гурман, М. Н. Служивый // Радиотехника. – 2012. – № 9. – С. 31–35.

2. Васильев, К. К. Моделирование алгоритмов навигации и управления для автономных необитаемых подводных аппаратов / К. К. Васильев, Д. А. Гурман // Автоматизация процессов управления. – 2013. – № 3 (33). – С. 27–31.

В других изданиях:

1. Васильев, К. К. Моделирование системы управления движением объекта при случайных воздействиях / К. К. Васильев, Д. А. Гурман // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : Труды Шестой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ). – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – С. 75–76.

2. Васильев, К. К. Оптимальное управление и оценивание движения корабля по заданной линии пути / К. К. Васильев, Д. А. Гурман // Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации : сборник научных трудов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи. – Ульяновск : УлГТУ, 2009. – Т. 1. – С. 193–200.

3. Васильев, К. К. Исследование алгоритмов калмановской фильтрации процесса движения объекта / К. К. Васильев, Д. А. Гурман // Информатика, моделирование, автоматизация проектирования: сборник научных трудов / под ред. Н. Н. Войта. – Ульяновск: УлГТУ, 2010. С. 131–136.

4. Васильев, К. К. Разработка и моделирование алгоритмов навигации автономного необитаемого подводного аппарата / К. К. Васильев, Д. А. Гурман // Интегрированные автоматизированные системы управления : сборник докладов научно-технической конференции / под ред. Э. Д. Павлыгина. – Ульяновск : ФНПЦ ОАО «НПО «Марс», 2011. – С. 93–95.

5. Васильев, К. К. Анализ установившихся погрешностей определения координат движущегося объекта / К. К. Васильев, Д. А. Гурман // Труды РНТОРЭС им. А. С. Попова. Серия : Научная сессия, посвященная Дню Радио. Вып. LXVI. – Москва, 2011. – С. 392–393.

6. Васильев, К. К. Использование алгоритмов SLAM с линейным фильтром Калмана для оценивания положения подвижных объектов / К. К.

Васильев, Д. А. Гурман // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : Труды Седьмой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ). – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – С. 134–135.

7. Васильев, К. К. Анализ методов оценивания координат автономного подвижного объекта в условиях ограниченной видимости / К. К. Васильев, Д. А. Гурман, М. Н. Служивый // Труды РНТОРЭС им. А. С. Попова. Серия : Цифровая обработка сигналов и ее применение. Вып. XIV-1. – Москва, 2012. – С. 49–52.

8. Гурман, Д. А. Алгоритм оптимального оценивания и управления автономного необитаемого подводного аппарата в трехмерном пространстве / Д. А. Гурман // Современные проблемы проектирования, производства и эксплуатации радиотехнических систем : сборник научных трудов. Восьмой выпуск. – Ульяновск: УлГТУ, 2012. – С. 100–104.

9. Васильев, К. К. Оценка выигрыша эффективности оптимального управления в базовой системе координат / К. К. Васильев, Д. А. Гурман // Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : Труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции (с участием стран СНГ). – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – С. 73–75.

Гурман Дмитрий Александрович

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В БАЗОВОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Автореферат

Подписано в печать 14.11.2013. Формат 60х84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ 1064.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, Северный Венец, 32.