

На правах рукописи

Кабанов Дмитрий Сергеевич

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА
С КОРРЕКЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Специальность 05.07.09

Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре 604 «Системный анализ и управление» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ)

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор В.В. Малышев

Официальные оппоненты: Толпегин Олег Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессов управления» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова

Брусов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры 106 «Динамика и управление летательных аппаратов» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ)

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит» (ОАО «СПМБМ «Малахит»)

Защита состоится «13» декабря 2012 года в 15.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете, МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4

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

Автореферат разослан «12» ноября 2012 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.125.12
кандидат технических наук, доцент

В.В. Дарнопых

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Расширение масштабов океанологических исследований и бурное развитие вычислительной техники привели к созданию автоматических подводных аппаратов (АПА). К актуальным сферам применения АПА относятся: обзорно-поисковые работы, геологоразведочные работы, подледные работы, аварийно-спасательные работы, доставка полезной нагрузки (ПН) к объектам (подводным и надводным) и другие.

Создание новых и модернизация существующих АПА продолжают оставаться важным направлением научно-исследовательской деятельности ведущих стран мира. Это связано с приближением технологий и способов применения существующих аппаратов к предельным режимам, истощением ресурсов, возрастанием требований к функциональным возможностям, исключением человеческого фактора из опасных сфер деятельности и расширением спектра решаемых задач. На практике требования к траектории, точности доставки ПН и углам подхода АПА к объектам существенно возросли, т.к. появились объекты стыковки (ОС) – специализированные подводные станции, способные принимать АПА с ПН и запускать его вновь.

Современные достижения в области вычислительной техники и микроэлектроники позволяют бортовой системе управления обрабатывать большой объем информации и осуществлять работу АПА в автономном режиме. Однако при проектировании и эксплуатации АПА был выявлен ряд проблем в области динамики и управления движением АПА, связанных с его особенностями как объекта управления: наличием нескольких принципиально различных участков движения АПА, перестройкой исполняемой миссии в процессе движения, непостоянством многих параметров АПА в процессе движения, что требует подстройки коэффициентов в законе управления в темпе движения.

Повышение требований к точности доставки и необходимость поиска новых траекторий при изменении целевого ОС в процессе движения приводят к исследованию возможности формирования оптимальных траекторий по критерию обеспечения точности доставки ПН к ОС и минимизации затрат на управление. В общем случае система уравнений динамики АПА имеет большую размерность и специфику, связанную с перемещением в вязкой среде, поэтому в настоящее время алгоритмы оптимизации траектории, с помощью которых вычисляется в процессе движения требуемое управление, не применяются. Построение устойчивых алгоритмов поиска оптимальной траектории в реальном масштабе времени затруднено, а зачастую невозможно ввиду трудности обеспечения сходимости решения двухточечных краевых задач. Поэтому на базе имеющихся в настоящее время научных подходов для решения подобных задач требуется разработать методику и алгоритмы,

которые позволят получать надежное (в смысле сходимости) решение задачи оптимизации траектории в реальном времени движения АПА. В этой связи тема работы, безусловно, является актуальной.

Развитию теории оптимального управления и вычислительных алгоритмов управления сложными динамическими системами посвятили свои работы: М.Д. Агеев, В.Н. Буков, В.Т. Бобронников, С.А. Горбатенко, В.И. Гурман, Л.В. Киселев, М.Н. Красильщиков, А.А. Красовский, Н.Н.Красовский, В.Ф. Кротов, А.А. Лебедев, Л.Н. Лысенко, В.В. Малышев, Р.П. Федоренко, В.Ф. Филаретов, Ф.Л. Черноусько, А.А. Ярошевский и другие.

Цель работы заключается в разработке методики формирования оптимального управления движением автоматического подводного аппарата для доставки полезной нагрузки к объекту стыковки в условиях сложного рельефа дна.

Для достижения этой цели в работе поставлены и решены следующие **основные задачи**:

1. Создание алгоритма оптимизации динамики АПА с параметрическим заданием структуры управления.

2. Разработка алгоритма оптимального выведения АПА на глубину и курс.

3. Оценка маневренных возможностей АПА для доставки ПН к ОС (построение области достижимости (ОД) – области пространства в которую АПА может доставить ПН с учетом ограничений на максимально допустимую перегрузку и энергоресурс двигателя).

4. Разработка адаптивного алгоритма высокоточного и безопасного терминального наведения АПА с огибанием (в вертикальной плоскости) и обходом (в горизонтальной плоскости) препятствий в виде донного рельефа (скал, опор мостов, нефтяных платформ и других морских технологических сооружений) и обеспечением требуемого угла подхода к ОС.

5. Реализация режима перенацеливания на терминальном участке наведения АПА.

6. Разработка программно-математического обеспечения для моделирования функционирования АПА с использованием разработанных алгоритмов.

7. Математическое моделирование динамики АПА с использованием полных уравнений движения тела в вязкой среде.

Данная работа направлена на решение комплекса перечисленных задач и вносит существенный теоретический и практический вклад в развитие систем управления АПА.

Объект исследования составляет автоматический подводный аппарат.

Предмет исследования методика формирования оптимального управления АПА для доставки ПН к ОС.

В работе **использованы методы** системного анализа, динамики полёта, динамики аппаратов в гидросфере, теории оптимального управления, математического моделирования.

Научная новизна результатов работы состоит в следующем:

1. Предложена новая методика решения двухточечных краевых задач с параметрическим заданием структуры управления. Методика применима и для случаев, когда структура содержит режим особого управления, также впервые с ее помощью оптимизирована траектория АПА. Методика позволяет за счет коррекции параметров структуры управления производить автоматизацию поиска оптимального решения.

2. Разработан алгоритм коррекции параметров структуры управления для формирования оптимальной траектории выведения, терминального наведения АПА с учетом огибания (обхода) препятствий и проведено сравнение с известными решениями.

3. Разработан алгоритм коррекции параметров структуры управления для построения области достижимости.

4. Разработан программный комплекс моделирования движения АПА с использованием предложенных алгоритмов оптимизации на основе технологии объектно-ориентированного анализа и проектирования.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработанная методика коррекции параметров структуры управления является универсальным средством решения различных задач оптимизации движения АПА. Входящие в нее алгоритмы не связаны с большими вычислительными затратами и позволяют формировать оптимальную траекторию в реальном времени по ходу движения, что подтверждается результатами моделирования.

2. Созданные алгоритмы оптимизации с коррекцией параметров структуры управления позволяют обеспечить сходимость итерационных процедур решения двухточечной краевой задачи с использованием метода Ньютона и метода последовательных приближений Крылова-Черноузько путем выбора начального приближения для сопряженных переменных и начальной программы управления соответственно.

3. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение позволяет решить задачу доставки ПН к ОС путем реализации сложных пространственных траекторий с учетом огибания и обхода препятствий различной формы и заданных углов подхода к ОС.

4. Программно-математическое обеспечение создано в средах CodeGear Delphi 2007, Matlab R2007 и Wolfram Mathematica 7 для сокращения сроков и трудоемкости проектирования алгоритмов управления движением АПА.

Внедрение результатов работы. Прикладные результаты работы внедрены в ОАО «ГНПП «Регион» и в учебный процесс кафедры «Системного анализа и управления» МАИ, а также при проведении НИР по проекту РФФИ № 09-08-00829 (2009-2011), что подтверждается соответствующими актами о внедрении, а также грантом РФФИ № 12-08-31359 (2012-2013) по разработке алгоритмов оптимального управления автоматическим подводным аппаратом.

Достоверность результатов работы подтверждается:

1. Использованием апробированных математических моделей движения АПА, функционирования информационно-измерительных и управляющих средств.

2. Корректным использованием методов теории оптимального управления, вычислительной математики и компьютерных технологий.

3. Сравнением разработанных оптимальных решений с результатами, полученными с использованием известных методов решения.

4. Результатами комплексного математического моделирования процесса управляемого движения АПА на всех участках движения АПА и опытом решения подобного рода задач для ОАО «ГНПП «Регион» с использованием результатов работы.

На защиту выносятся:

1. Методика решения задачи оптимизации траектории с коррекцией параметров структуры управления.

2. Алгоритм выведения на глубину и курс с коррекцией параметров структуры управления.

3. Алгоритм пространственного терминального наведения с огибанием (обходом) препятствий и учётом ограничений по углу подхода к объекту стыковки.

4. Построение области достижимости АПА с коррекцией параметров структуры управления.

5. Результаты моделирования функционирования АПА, полученные на базе разработанного программно-математического комплекса, использующего полную модель динамики АПА и разработанные алгоритмы.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались:

- на научных семинарах кафедр «Системный анализ и управление» и «Информационно-управляющие комплексы ЛА» МАИ;

- на восьми международных научно-технических конференциях;

- на совещании специалистов ОАО «ГНПП «Регион».

Публикации. По теме диссертационного исследования автором опубликовано 22 работы, в том числе шесть статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ [1 - 6], одна работа в зарубежном издании [7], одно методическое пособие для преподавателей и студентов старших курсов [8], два свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ [9, 10] и двенадцать работ [11 - 22] в сборниках тезисов докладов научно-технических конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа структурирована в виде четырех глав, последовательно отражающих этапы решения целевой задачи и полученные при этом научные и прикладные результаты, списка литературы из 131 наименования и приложения. Объем работы составляет 178 страниц, в том числе 52 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность разработки алгоритмов оптимального управления подводными аппаратами для освоения океана, обусловленная увеличением автономности непрерывной работы и существенным расширением спектра решаемых задач. Сформулирована цель диссертационной работы и приведено ее краткое содержание.

В первой главе диссертационной работы дана характеристика задачи управления АПА, выбран целевой критерий достижения требуемой точности доставки полезной нагрузки АПА к объекту стыковки:

$$J = F^{(q)}[\mathbf{X}(t_f), t_f, \bar{t}^{(q)}] + \sum_{s=1}^q \int_{t_0}^{t_f} f_0^{(s)}(\mathbf{X}, u^{(s)}, t, \bar{t}^{(q)}) dt \Big|_{t^{(s)} \in [t_a^{(s)}, t_b^{(s)}]}, \quad (1)$$

где $F^{(q)}[\mathbf{X}(t_f), t_f, \bar{t}^{(q)}] = \frac{1}{2} \Delta \mathbf{X}_f^T \boldsymbol{\rho} \Delta \mathbf{X}_f$, $\Delta \mathbf{X}_f = \mathbf{X}(t_f) - \mathbf{X}_f$, \mathbf{X}_f – требуемое значение вектора состояния $\mathbf{X} = (V, x, y, z, \theta, \varphi)^T$ в конечный момент времени t_f , $\boldsymbol{\rho}$ – диагональная матрица коэффициентов, q – число участков управления, $\bar{t}^{(q)} = \text{col}(t^{(1)}, \dots, t^{(q)})$ – моменты времени смены участков управления, $f_0^{(s)}(\mathbf{X}, u^{(s)}, t, \bar{t}^{(q)})$ – функция, определяющая ограничения и качество процесса управления, $u^{(s)}$ – управление на участке с номером s .

Полная динамическая модель пространственного движения АПА описывается шестью сложными нелинейными дифференциальными уравнениями с переменными параметрами в связанной с корпусом АПА системе координат. Эти уравнения учитывают перекрестные связи и взаимовлияния между всеми степенями свободы АПА, а также гидростатические и гидродинамические силы и моменты, действующие на него со стороны окружающей вязкой среды. В связи с тем что движение происходит в земной стартовой системе координат, к шести уравнениям добавляются еще шесть кинематических соотношений, обеспечивающих переход от связанной к земной стартовой системе координат:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}(\mathbf{X}) \cdot \boldsymbol{\Omega},$$

где $\mathbf{X} = (x, y, z, \vartheta, \psi, \gamma)^T$ – вектор положения и ориентации АПА в земной стартовой системе координат; ϑ, ψ, γ – углы дифферента, курса и крена, соответственно; $\boldsymbol{\Omega} = (V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ – вектор проекций линейной и угловой скоростей движения АПА на оси связанной системы координат; $\mathbf{A}(\mathbf{X})$ – матрица перехода из связанной в земную стартовую систему координат.

Для получения желаемой программной траектории АПА используются уравнения динамики АПА в траекторной системе координат

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, \mathbf{u}, t), \quad (2)$$

где f – вектор-функция, имеющая непрерывные частные производные по \mathbf{X} , t и \mathbf{u} , $\mathbf{X} = (V, x, y, z, \theta, \varphi)^T$ – вектор состояния; V – скорость АПА; θ, φ – углы наклона и поворота траектории, соответственно; \mathbf{u} – m -мерный вектор

управления на интервале времени $t \in [0, t_f]$, t_f – конечное время движения. На вектор управления накладываем ограничение $\mathbf{u}(t) \in U$.

Для решения задачи необходимо определить такой алгоритм функционирования АПА, который обеспечит выполнение требований целевого критерия для выбранной схемы действия АПА. Траектория АПА состоит из следующих участков: выведения на глубину и курс, прямолинейного маршевого движения вблизи поверхности дна, огибания (обхода) препятствия (при его наличии), терминального наведения и торможения.

С учетом описанной схемы движения и особенностей траектории исходная целевая задача работы интерпретируется как задача научно-обоснованного выбора оптимальной траектории движения АПА с учетом фазовых ограничений и располагаемых энергетических ресурсов.

Значительное влияние на выбор траектории движения АПА оказывают следующие особенности АПА как объекта управления:

1. Изменение гидродинамических и массовых характеристик приводит к необходимости выбора специальных алгоритмов для каждого конкретного участка движения.

2. Особенности приема навигационной информации от системы акустического позиционирования вынуждают АПА совершать длительные переходы на марше в район объекта стыковки вблизи поверхности дна.

3. Размерность системы уравнений динамики АПА существенно осложняет применение известных алгоритмов оптимизации траектории в реальном времени.

4. Необходимость обеспечения высокоточного наведения на терминальном участке траектории.

С учетом изложенного сформулировано основное требование к решению задачи доставки полезной нагрузки АПА к ОС: алгоритм управления должен иметь переменную структуру для обеспечения успешного функционирования на различных участках траектории и должен быть реализован для выдачи сигналов управления в реальном времени движения АПА для обеспечения перенацеливания.

Таким образом, в первой главе представлены характерные особенности АПА как объекта управления, выделены участки траектории АПА, выбран целевой критерий, приведены основные уравнения динамики АПА, а также сформулированы основные требования к решению задачи доставки ПН к ОС.

Во второй главе разработаны алгоритм коррекции параметров структуры управления и методика решения задачи оптимизации траектории АПА с параметрическим заданием структуры управления, включающая построение области достижимости АПА.

В задачах оптимального управления АПА с ограничениями на управление возможно наличие участков с предельными и особыми управлениями. Решение задачи с использованием принципа максимума позволяет выявить структуру оптимального управления, которое вычисляется по расчетным формулам, в том числе для режима особого управления на соответствующих участках интервала

оптимизации. Используя моменты времени τ_i переключения управления в качестве параметров, представим структуру управления в виде

$$u(t) = u_1(t) + \sum_{i=1}^r \Delta u_i(t) l(t, \tau_i), \quad \Delta u_i = -u_i + u_{i+1}, \quad (3)$$

где $i = \overline{1, r}$, i – номер участка структуры управления, r – количество переключений управления в структуре, u_i и u_{i+1} – управления на предыдущем и последующем участках этой структуры относительно τ_i соответственно, а $l(t, \tau_i)$ – функции вида

$$l(t, \tau_i) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \operatorname{arctg}(k(t - \tau_i)),$$

k – коэффициент, при неограниченном возрастании которого функция $l(t, \tau_i)$ приближается к единичной функции Хэвисайда.

Для оптимизации траектории АПА в качестве управления в системе (2) рассматривается перегрузка $n = (R - G_A) / |G_A|$, где R – главный вектор действующих сил, $G_A = G - A$, G – сила тяжести, A – сила Архимеда.

Для режима особого управления АПА в работе из необходимых условий существования особого управления $\frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial H}{\partial n_{y,z}} \right) = 0$ получены следующие

расчетные формулы, определяющие значения проекций перегрузок n_y и n_z :

$$n_y \frac{g^2}{V^3} \left(D_1 + \frac{a^3 \Psi_0^2 g^2 k_1^2}{V} \right) + n_z \frac{g^2}{V^3} \left(D_2 - \Psi_0 \Psi_\varphi \frac{a^3 g^2 k_1^2}{V \cos \theta} \right) + n_y n_z \frac{g^2}{V^3} D_3 + n_x n_z \frac{g^2}{V^3} D_4 + n_x D_5 + D_6 = 0, \quad (4)$$

$$n_y \frac{g^2}{V \cos \theta} D_{1z} + n_y^2 D_{2z} + n_z D_{3z} + n_x n_y D_{4z} + D_{5z} = 0, \quad (5)$$

где $D_i(\mathbf{X}, \Psi)$, $D_{jz}(\mathbf{X}, \Psi)$ ($i = \overline{1, 6}$, $j = \overline{1, 5}$) – сокращения, например,

$$D_5 = -\Psi_0 \frac{a^3 g^3}{V^3} \cos^2 \theta - \Psi_x \frac{a^2 g^2}{V} \cos \varphi - \Psi_y \frac{a^2 g^2}{V} \sin 2\theta + 2\Psi_z \frac{a g^2}{V} \cos^2 \theta \sin \varphi + \\ + \Psi_V \frac{a^3 g^3}{V^2} \sin 2\theta - \Psi_x \frac{a^2 g^2}{V} \cos 2\theta \cos \varphi - \Psi_z \frac{a^2 g^2}{V} \sin^2 \theta \sin \varphi + n_x \left(-\Psi_0 \frac{a^3 g^3}{V^3} \sin \theta - \right. \\ \left. - \Psi_x \frac{g^2}{V} \sin \theta \cos \varphi + \Psi_y \frac{a^2 g^2}{V} \cos \theta + \Psi_z \frac{a^2 g^2}{V} \sin \theta \sin \varphi - 2\Psi_V \frac{a^3 g^3}{V^2} \cos \theta \right) + 2\Psi_\theta \frac{a^3 g^3}{V^3} n_x^2,$$

здесь H – гамильтониан, Ψ – вектор сопряженных переменных, $a = 1 - A/G$.

Известно, что решение краевой задачи классическими методами, например, методом Ньютона, связано с вычислительными трудностями, обусловленными поиском начального приближения для сопряженного вектора $\Psi(0)$ и обеспечением сходимости алгоритма при изменении граничных условий задачи оптимизации. Для преодоления этих трудностей предлагается рассмотреть следующую вспомогательную задачу оптимизации. Для этого моменты переключения структуры управления (3) τ_i , $i = \overline{1, r}$, (при

нефиксированном моменте окончания процесса t_f полагается $i = \overline{1, r+1}$) рассматриваются в качестве компонент обобщенного вектора состояния, а за управления во вспомогательной задаче оптимизации выбираются производные от них по времени $\dot{\mathbf{t}} = \mathbf{w}$. Тогда уравнения для обобщенного вектора состояния записываются в виде:

$$\dot{\mathbf{X}} = f(\mathbf{X}, u, t)l(t_f, t),$$

$$\dot{\mathbf{t}} = \mathbf{w}l(t_f, t),$$

здесь время окончания t_f также является корректируемым параметром, а u представляется в виде структуры (3).

Введением нового вектора управления \mathbf{w} исходная задача оптимизации по определению управления u решается косвенно – через нахождение вектора \mathbf{w} .

Решение исходной технической задачи сводится к необходимости решения совокупности следующих двух задач:

1. Задача формирования программно-позиционного управления для траектории доставки ПН к ОС с обеспечением всех ограничений, включая терминальные.

2. Задача стабилизации АПА на сформированной траектории.

Для решения первой задачи разработан алгоритм с коррекцией параметров структуры управления, формирующий оптимальные значения проекций перегрузок в соответствии с (3), (4) и (5) при использовании в качестве критерия функционала обобщенной работы [3, 4, 6]. Алгоритм с коррекцией структуры управления позволяет обеспечить сходимость итерационных процедур решения двухточечной краевой задачи с использованием метода Ньютона и метода последовательных приближений Крылова-Черноусько путем выбора начального приближения для сопряженных переменных и начальной программы управления соответственно. При этом учтены ограничения на управление, терминальный промах и положение линии подхода.

Предлагаемая методика применена для решения терминальной задачи на этапе выведения, конечном участке наведения АПА, а также для формирования внешней границы области достижимости [5].

Алгоритм расчета траектории доставки ПН к ОС дополнен процедурой формирования области достижимости. Фрагмент внешней границы области достижимости, а также переходные процессы для моментов переключения структуры управления (3) приведены на рис. 1. Исследования показали, что алгоритм построения области достижимости позволяет выбирать оптимальные значения моментов времени смены структуры управления для произвольно задаваемых из интервала оптимизации их начальных значениях (при сохранении их последовательности).

Решение второй задачи заключается в формировании управляющих воздействий на основе отклонений текущих значений вектора состояния АПА от требуемых. В работе эта задача решена с использованием ПИД-регулятора и алгоритма оптимальной стабилизации с применением прогнозирующей модели.

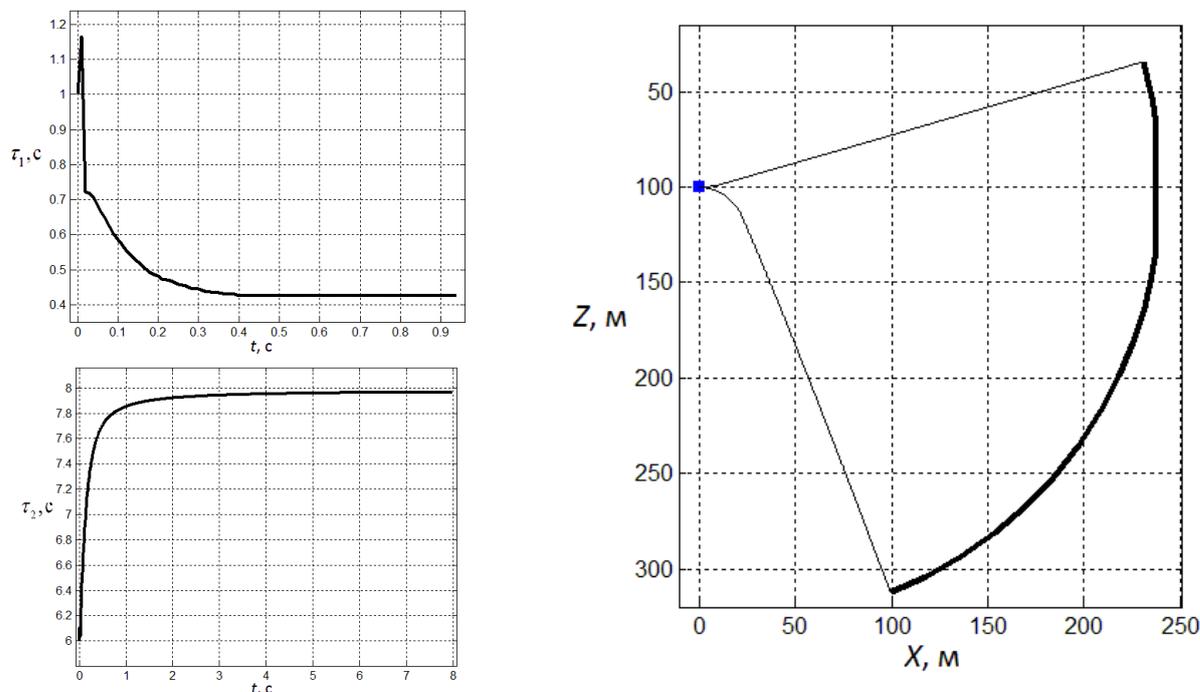


Рис. 1 Фрагмент области достижимости

Построение траектории доставки ПН к ОС на терминальном участке (рис. 2) осуществляется для текущей оценки местоположения АПА таким образом, чтобы на правом конце обновляемой траектории выполнялись граничные условия по линейным и угловым координатам в пространстве.

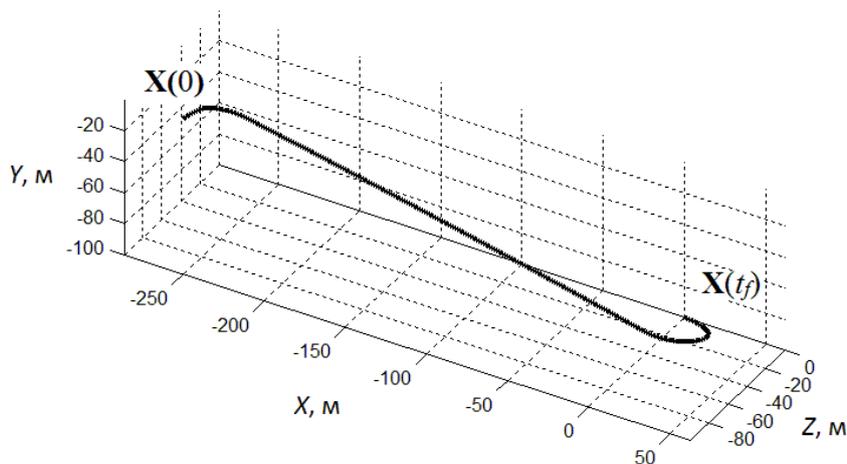


Рис. 2 Траектория АПА на терминальном участке

Таким образом, во второй главе предложена методика решения краевых задач с использованием алгоритма коррекции параметров структуры управления. С помощью этого алгоритма решены задачи выведения АПА на требуемые глубину и курс начала маршевого участка движения, терминального наведения, а также построена область достижимости АПА для осуществления адаптивного управления с элементами интеллекта при выполнении целевой задачи.

В третьей главе на основе методики, разработанной во второй главе, решена задача формирования траектории доставки ПН к ОС от старта АПА до момента стыковки. Сформирован единый алгоритм программно-позиционного

управления АПА с элементами интеллекта при изменении информационной обстановки в процессе движения АПА и с использованием разработанных алгоритмов оптимального наведения на различных участках траектории: выведения, маршевого прямолинейного движения, наведения с огибанием элементов рельефа (при обнаружении препятствия на пути), наведения с учетом поправки в определении местоположения ОС по данным гидролокатора АПА, наведения с учетом поправки в величине требуемого угла подхода к ОС.

Разработан алгоритм управления АПА с прогнозирующей моделью, который при наличии на пути препятствия позволяет сформировать траекторию огибания и обхода препятствия при движении вблизи поверхности дна.

Определим форму препятствия в критерии (1) штрафной функцией вида:

$$Q_u^s(\mathbf{X}) = \begin{cases} 0, & x_f - x > R_1 \text{ или } x_f - x < L_2, \\ 0, & j_s y > j_s y_s, \\ \rho(y - y_s)^2, & j_s y \leq j_s y_s \text{ и } L_2 < x_f - x < R_1, \end{cases} \quad y_s = \begin{cases} -j_s a_s (x - x_f) + b_s, & L_2 < x_f - x < L_1, \\ j_s \sqrt{R_1^2 - (x - x_f)^2}, & L_1 < x_f - x < R_1, \end{cases}$$

$$f_0^{(s)} = Q^s(\mathbf{u}^{(s)}) + Q_u^s(\mathbf{X}),$$

где L_1 , L_2 , R_1 , y_s , a_s , b_s – параметры формы препятствия, j_s – индекс направления обхода препятствия (при формировании траектории в вертикальной плоскости: $j_s = 1$ – огибание препятствия производится сверху; в горизонтальной плоскости: $j_s = 1$ – обход слева, $j_s = -1$ – для обхода справа), ρ – заданный коэффициент.

На рис. 3 приведены траектории движения АПА вблизи донной поверхности с огибанием и обходом препятствия и доставкой ПН АПА в заданную точку для одного из вариантов граничных условий.

В алгоритме наведения производится периодическое перестроение траектории доставки ПН на основе текущих данных, поставляемых навигационной системой, о состоянии АПА и положении ОС, определяемом с помощью гидролокатора и оптических датчиков на терминальном участке траектории движения АПА. При моделировании поправки в определении местоположения ОС, величины требуемого угла подхода к ОС выбирались из заданных диапазонов.

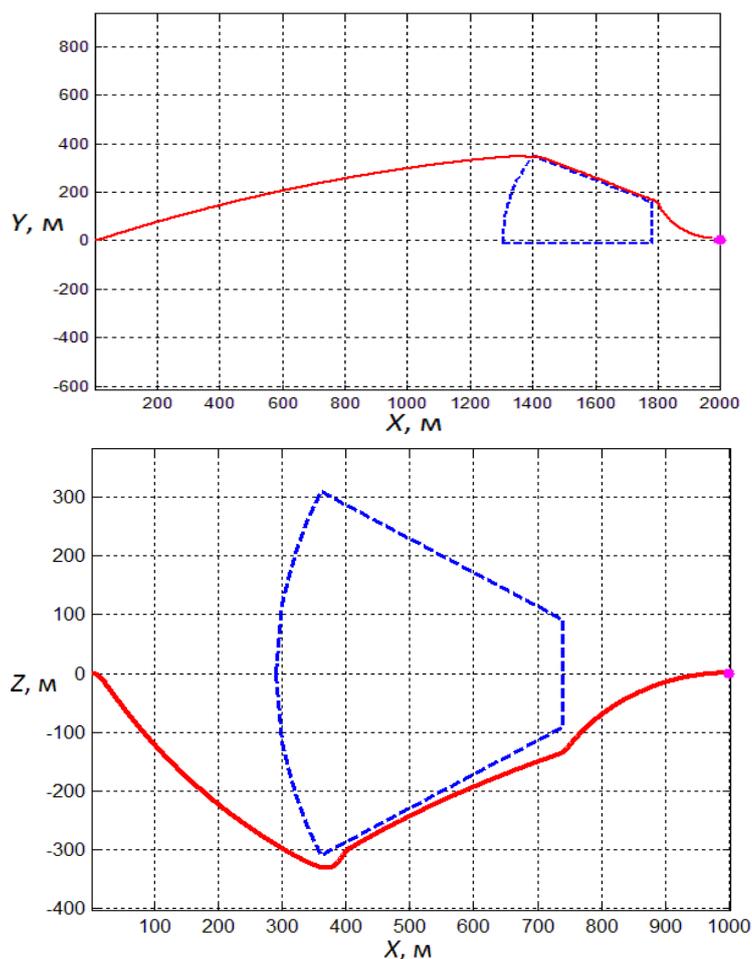


Рис. 3 Огибание и обход препятствия

После огибания препятствия формирование траектории движения АПА производится с использованием алгоритма с коррекцией параметров структуры управления. Проведенные вычисления показали, что для ускорения сходимости алгоритма целесообразно произвести оценку начальных значений параметров структуры управления (τ_1, τ_2) из геометрических соотношений. Как показывают результаты математического моделирования, предложенный алгоритм формирования управления позволяет строить траекторию АПА в реальном времени. На рис. 4 представлены этапы решения задачи доставки ПН к ОС.

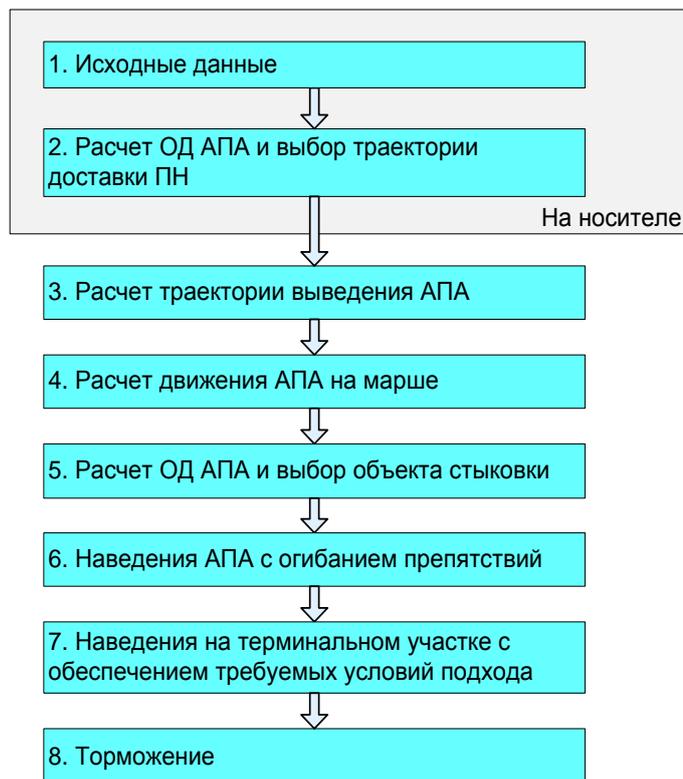


Рис. 4 Этапы решения задачи доставки полезной нагрузки АПА к ОС

Таким образом, основные результаты третьей главы состоят из решения сложной комплексной задачи (включающей в себя решение специфических подзадач управления с огибанием препятствий) с использованием разработанной методики и программно-позиционных алгоритмов доставки полезной нагрузки АПА к ОС для различных сценариев применения.

Четвертая глава работы посвящена применению разработанной методики и алгоритмов для моделирования функционирования гипотетического АПА с использованием программно-математического комплекса.

Математическая модель программного комплекса состоит из модели АПА, состоящей в свою очередь из модели рулевых приводов, системы управления, гидролокатора, двигателя, наиболее полной модели движения АПА, а также моделей препятствий. В соответствии с используемой в работе структурной схемой система управления АПА состоит из систем навигации, наведения и стабилизации. Блок наведения включает в себя алгоритмы оптимального выведения АПА на курс и глубину начала маршевого участка, метод адаптивного наведения на терминальном участке траектории с огибанием препятствий и обеспечением требуемого угла подхода к ОС. Модель системы наведения дополнена модулем, реализующим построение ОД АПА. В блоке стабилизации использовалась математическая модель в виде ПИД-регулятора и алгоритма оптимальной стабилизации.

На комплексе программно-математического моделирования функционирования АПА с имитацией работы всех его подсистем проводилась проверка работоспособности предлагаемых алгоритмов оптимального

управления. В данном разделе проведен сравнительный анализ решения задачи выведения на основе предлагаемого алгоритма коррекции параметров структуры управления и с используемым на практике законом управления вида $\mathcal{G} = k_h (y - y_f + y_{bal})$, где k_h – эмпирически подбираемый коэффициент перехода от глубины к дифференту \mathcal{G} ; y – текущая глубина АПА; y_f – требуемая глубина выведения АПА; y_{bal} – балансирующая поправка на глубину.

На рис. 5 приведены графики сравнения функционирования АПА на участке выведения АПА в вертикальной плоскости, построенные в соответствии с алгоритмом оптимизации траектории (кривая 1) и закона управления, приведенного выше (кривая 2).

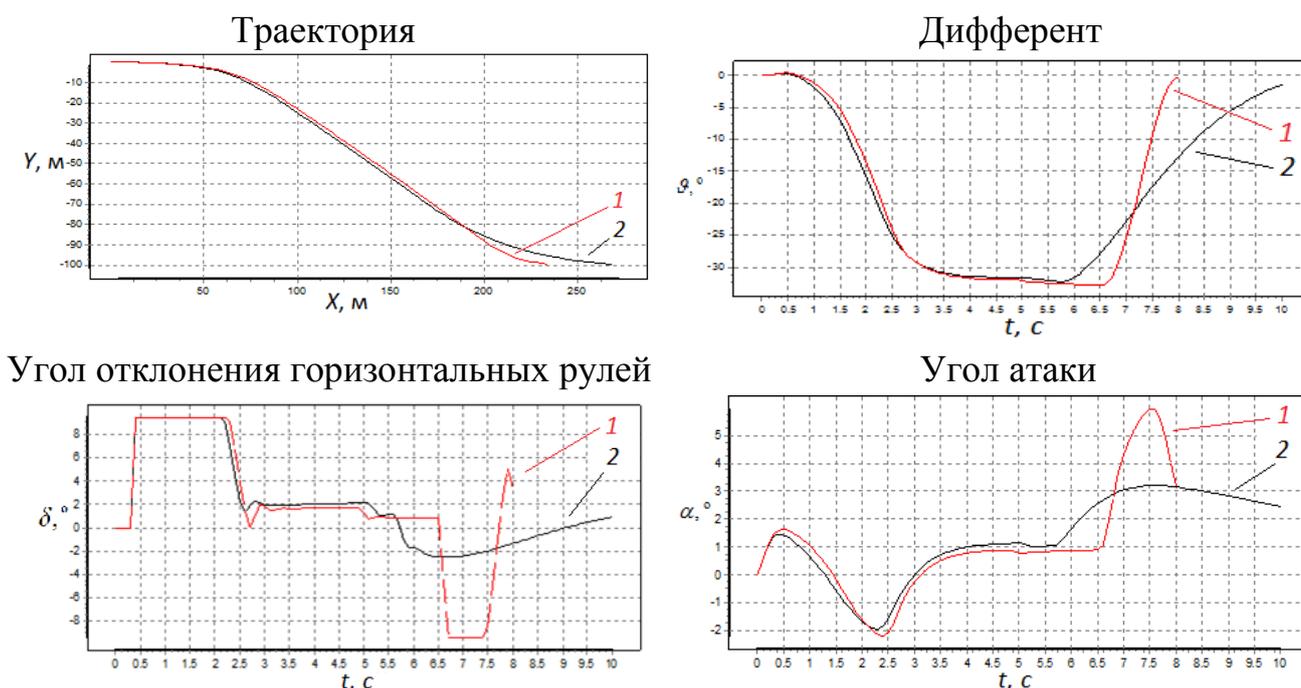


Рис. 5 Результаты моделирования на полной модели динамики АПА

Как видно из графиков, при использовании предлагаемого алгоритма оптимизации обеспечивается быстрое проведение маневра и необходимая точность решения задачи, подтверждается возможность реализации его на полной математической модели динамики АПА. Кроме того, предлагаемый алгоритм позволяет автоматизировать формирование управления и избавляет от поиска эмпирических коэффициентов, обеспечивающих компромиссное по точности и быстрдействию решение.

Проведено математическое моделирование доставки ПН АПА к ОС. Задача рассматривается в детерминированной постановке, однако случайные факторы были учтены в моделях измерительных приборов, при изменении моментов смены участков движения АПА и условий подхода к ОС: местоположения препятствия, ОС и угла подхода к ОС.

Работоспособность созданных алгоритмов для решения целевой задачи проверялась с учетом действия следующих случайных факторов: ошибок измерения начального положения и ориентации ОС, ошибок гидролокатора АПА (горизонтальный и вертикальный пеленги, дальность), изменения времени

обновления информации о положении и ориентации ОС для формирования команды на перенацеливание.

Проведено статистическое моделирование, показавшее высокую точность доставки ПН к ОС. При этом оценки математического ожидания отклонений терминальных значений по линейным и угловым координатам составили $M[\Delta x]=0.53$ м, $M[\Delta y]=0.81$ м, $M[\Delta z]=0.32$ м, $M[\Delta \theta]=1.3^\circ$, $M[\Delta \varphi]=0.6^\circ$; оценки среднеквадратического отклонения: $\sigma_{\Delta x}=0.44$ м, $\sigma_{\Delta y}=0.62$ м, $\sigma_{\Delta z}=0.16$ м, $\sigma_{\Delta \theta}=0.6^\circ$, $\sigma_{\Delta \varphi}=0.4^\circ$.

Программная реализация описанных алгоритмов осуществлена в блоке наведения и стабилизации комплекса программно-математического моделирования. Программный комплекс разработан на языке Object Pascal в среде CodeGear Delphi 2007 [9]. Библиотека комплекса состоит из нескольких модулей, содержащих набор проблемно-ориентированных классов Delphi, предназначенных для представления математических моделей сложных динамических систем и их компонент, средства моделирования и численные методы интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений.

Разработан комплекс программ (всего более 30) для проверки работоспособности алгоритмов оптимизации на различных участках с использованием сред разработки CodeGear Delphi 2007, Matlab R 2007, Wolfram Mathematica 7:

- математического моделирования процесса управляемого движения центра масс АПА и углового движения на всех участка движения [10];
- оценки точности доставки ПН АПА;
- реализации процедур построения траекторий наведения АПА и областей достижимости [9];
- имитации процесса терминального наведения в заданную точку пространства с учетом изменения информации о положении ОС (перенацеливания).

На рис. 6 приведена траектория движения АПА от момента старта до момента доставки ПН АПА к ОС (участок выведения, маршевого движения, огибания препятствия, терминального наведения и торможения).

Данные результаты подтверждают состоятельность предложенных алгоритмов оптимизации траектории движения АПА и достижение заданной точности решения целевой задачи.



Рис. 6 Траектория доставки полезной нагрузки к объекту стыковки

Таким образом, в четвертой главе апробированы разработанные алгоритмы оптимизации для решения целевой задачи путем математического моделирования движения гипотетического АПА с использованием полной модели динамики АПА и функционирования его подсистем на различных участках траектории с использованием созданного программного обеспечения в средах разработки CodeGear Delphi 2007, Matlab R 2007, Wolfram Mathematica 7.

В заключении диссертационной работы формулируются основные выводы и акцентируется внимание на важнейших ее результатах.

В приложении приведены характеристики исследуемого АПА, решения задач оптимизации траектории с изопериметрическими ограничениями, отсутствием ограничений на угол наклона траектории, также приведен алгоритм оптимальной стабилизации АПА на выбранной оптимальной траектории движения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

1. Разработана новая методика решения двухточечных краевых задач с параметрическим заданием структуры управления. Преимуществом методики является ее применимость для случаев наличия в структуре управления режима особого управления. Методика позволяет за счет коррекции параметров структуры управления производить автоматизацию поиска оптимального решения.

2. Разработан алгоритм с коррекцией параметров структуры управления, служащий как основным средством оптимизации траектории, так и вспомогательным для получения начального приближения сопряженных переменных при применении метода Ньютона и начальной программы управления для метода последовательных приближений Крылова-Черноуьско.

3. С использованием разработанного алгоритма оптимизированы участок выведения и терминальный участок функционирования АПА, построена область достижимости.

4. Предложено решение задачи адаптивного пространственного наведения АПА на терминальном участке с огибанием и обходом препятствий и организацией режима перенацеливания.

5. Проведено математическое моделирование динамики АПА для доставки ПН к ОС на базе разработанного программного комплекса, использующего полную модель динамики АПА и его подсистем, подтверждающее работоспособность созданных алгоритмов.

6. Впервые решена задача формирования управляющих воздействий для АПА в темпе движения на основе теории оптимального управления, что избавляет от процедуры эмпирического выбора коэффициентов в используемых на практике законах управления и позволяет производить доставку ПН к ОС по сложным пространственным траекториям.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

1. Кабанов Д.С., Крашенинников Б.А. Управление траекторией движения автомобиля с использованием алгоритма последовательной оптимизации // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. №10. С. 21-24.

2. Кабанов Д.С. Оптимальное управление ядерным реактором с учетом случайных возмущений // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т.52. №5. С. 27-30.

3. Малышев В.В., Кабанов Д.С. Оптимальное выведение на глубину автоматического подводного аппарата с коррекцией параметров структуры управления // Вестник МАИ. 2012. № 4. С. 88-96.

4. Малышев В.В., Кабанов Д.С. Оптимизация алгоритма доставки полезной нагрузки автоматическим подводным аппаратом // Электронный журнал Труды МАИ. 2012. Выпуск № 57.

5. Малышев В.В., Кабанов Д.С. Алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом для построения области достижимости // Изв. Вузов. Приборостроение. 2012. Т.55. № 7. С. 21–27.

6. Кабанов Д.С. Оптимизация пространственного маневра автоматического подводного аппарата с коррекцией параметров структуры управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 9. С. 57 – 61.

Публикации в зарубежных изданиях

7. D. Kabanov, S. Kabanov. Application of algorithm of forecasting model to the optimal control of nuclear reactor // Proceedings 4th MATHMOD Vienna, V.2: Full papers CD, 5-7 February 2003. Vienna University of Technology, Austria, P. 1466-1471.

Учебные пособия

8. Горбатенко С.А., Волхонская В.А., Кабанов Д.С. Сборник задач для проведения практических (семинарских) занятий по дисциплине «Динамика полета» // М.: Татинформ, 2012. 48 с.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

9. Построение оптимальной траектории движения автоматического подводного аппарата с использованием алгоритма коррекции параметров структуры управления / Кабанов Д.С. // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2012618879. 2012.

10. Программный комплекс имитационного моделирования движения летательных аппаратов / Федоров А.В., Кабанов Д.С., Непочатых А.А. // Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2012618878. 2012.

Другие публикации

11. Кабанов Д.С. Применение алгоритма с прогнозирующей моделью к оптимальному управлению ядерным реактором // Научная конференция школьников “XIII Сахаровские чтения”. 19-22 мая 2003. Санкт-Петербург. С. 23.

12. Кабанов Д.С., Крашенинников Б.А. Оптимальное управление траекторией движения автомобиля с объездом препятствий // Тезисы докладов 10 международной конференции “Системный анализ, управление и навигация”. - М.: Издательство МАИ. 2005. С. 53.

13. Кабанов Д.С. Позиционирование узлов беспроводных сенсорных сетей на основе статистической обработки измерений дальности между ними // Сб. трудов МАИ “Через тернии к звездам”. – М.: Изд-во МАИ. 2007. С. 209-217.

14. Кабанов Д.С. Позиционирование узлов беспроводных сенсорных сетей на основе методов оптимальной фильтрации // Тезисы докладов 13 междунар. конф. “Системный анализ, управление и навигация”. – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2008. С. 156- 158.

15. Александров А.А., Кабанов Д.С. Оптимизация траектории пространственного движения ЛА как твердого тела с учетом ограничений на управление // Тезисы докладов 13 междунар. конф. “Системный анализ, управление и навигация”. – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2008. С. 289-290.

16. Кабанов Д.С. Формирование математической гидроакустической модели подводного аппарата // Тезисы докладов 14 междунар. конф. “Системный анализ, управление и навигация”. – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2009. С. 289-290.

17. Малышев В.В., Кабанов Д.С. Оптимальная траектория движения материальной точки в пространстве с использованием алгоритма с заданной программой прогноза движения при ограничениях на управление // Тезисы

докладов 15 междунар. конф. “Системный анализ, управление и навигация”. – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2010. С. 61-62.

18. Малышев В.В., Кабанов Д.С. Оптимальное выведение автоматического подводного аппарата с использованием алгоритма коррекции параметров структуры управления // Тезисы докладов 9 Междунар. конф. “Авиация и космонавтика 2010”. – СПб.: Мастерская печати. 2010. С. 95-96.

19. Малышев В.В., Кабанов Д.С. Построение области достижимости с использованием алгоритма коррекции параметров структуры управления // Тезисы докладов 16 междунар. конф. “Системный анализ, управление и навигация”. – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2011. С. 66-67.

20. Малышев В.В., Кабанов Д.С., Федоров А.В. Алгоритм управления автоматическим подводным аппаратом при мониторинге подводных объектов // Тезисы докладов 10 Междунар. конф. “Авиация и космонавтика 2011”. – СПб.:Мастерская печати. 2011. С. 81.

21. Федоров А.В., Непочатых А.А., Кабанов Д.С. Программный комплекс моделирования движения автоматического подводного аппарата и алгоритмов поиска объектов // Тезисы докладов 17 междунар. конф. “Системный анализ, управление и навигация”. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2012. С. 80.

22. Малышев В.В., Кабанов Д.С., Федоров А.В. Анализ точности управляемого движения автоматического подводного аппарата с использованием программно-имитационного комплекса // Тезисы докладов 17 междунар. конф. “Системный анализ, управление и навигация”. – М.:Изд-во МАИ-ПРИНТ. 2012. С. 80-81.