

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Объект авторского права
УДК 629.7.05

ЛЕГКОСТУП
Виктор Валерьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ ПО ДАННЫМ
РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ПРИ НЕПОЛНОМ ОБЪЕМЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – системный анализ, управление
и обработка информации (промышленность)

Минск 2023

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Маркевич Виталий Эдмундович**, кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор производственного унитарного предприятия «Завод СВТ»

Официальные оппоненты **Марков Лев Николаевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник сектора фундаментальных и прикладных исследований открытого акционерного общества «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»

Солонар Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, профессор кафедры автоматизирующей радиолокации и приемопередающих устройств учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Оппонирующая организация Открытое акционерное общество «АЛЕВКУРП»

Защита состоится «7» сентября 2023 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. +375 17 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 22 » июня 2023 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

В. А. Рыбак

ВВЕДЕНИЕ

Решению задачи автономного управления различными объектами в последние десятилетия уделяется большое внимание. Это обусловлено интенсивным развитием транспортных средств наземного, морского и воздушного базирования, а также сложностью решаемых задач: навигация пассажирских транспортных средств и специальной техники на местности, обеспечение посадки и взлета беспилотной авиации, управление и наведение высокоточного оружия и т. д. Широкое распространение получили системы разностно-дальномерной навигации, такие как спутниковые навигационные системы типа GPS, ГЛОНАСС, а также наземные системы типа LORAN и РСДН-20 «Альфа» ввиду их высокой пропускной способности, а также из-за отсутствия необходимости в радиопередающем абонентском оборудовании.

Известно, что для применения разностно-дальномерных методов навигации на плоскости в системах LORAN и РСДН-20 требуется наличие по меньшей мере трех навигационных позиций. Для получения информации о пространственных координатах объекта с использованием спутниковых навигационных систем необходимо обеспечить прием радиосигналов как минимум от четырех навигационных космических аппаратов.

С увеличением требуемого количества навигационных позиций растет и вероятность потери полного набора навигационных радиосигналов. К тому же высокую точность навигации удастся получить лишь для определенной пространственной конфигурации навигационных позиций, когда линии или поверхности положения абонента стремятся образовать между собой угол, близкий к прямому. Это означает, что абонент должен находиться в некоторой окрестности точки, расположенной между всеми навигационными позициями, и принимать навигационные радиосигналы одновременно с различных сторон, что требует также наличия диаграммы направленности приемной антенны, близкой к круговой. Данное требование затрудняет пространственную селекцию источников навигационных радиосигналов. Кроме того, возможности современных средств радиоэлектронного противодействия работе навигационного оборудования еще больше осложняют решение задачи автономной навигации и управления объектом.

В данной диссертационной работе рассматривается подход, реализующий управление движением объекта вдоль гиперболы положения, образованной двумя навигационными позициями на плоскости. Это позволяет уменьшить количество минимально необходимых навигационных позиций на одну при использовании разностно-дальномерного метода навигации. Такое решение способно повысить эффективность работы существующих систем управления по информации разностно-дальномерных

навигационных систем, а также разработать новые системы, обладающие лучшими эксплуатационными характеристиками.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации включена в план научной работы учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» и соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. в области машиностроения, машиностроительных технологий, приборостроения и инновационных материалов (п. 4), обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 6). Связь с научными программами подтверждается внедрением результатов исследований при выполнении ОКР по разработке аппаратуры радиоуправления и визирования в ОАО «АЛЕВКУРП», а также при выполнении НИР по разработке перспективной системы управления объектом в РПУП «Завод точной электромеханики».

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования – повышение эффективности функционирования систем автономного управления подвижными объектами на основе разностно-дальномерной информации в условиях ограниченного числа передающих навигационных позиций.

Для достижения поставленной цели были решены следующие *основные задачи*:

- провести аналитический обзор публикаций, посвященных навигации подвижных объектов с использованием разностно-дальномерной информации, методам наведения, методам синтеза систем управления, а также выделить возможные сценарии организации управления подвижными средствами, при которых требуется решение задачи в случае ограниченного числа разностно-дальномерных навигационных измерений;

- выполнить аналитический синтез оптимальной системы управления, использующей неполный объем разностно-дальномерных навигационных измерений;

- выполнить сравнительный анализ эффективности функционирования разработанной системы управления с классической системой управления объектами на основе метода пропорциональной навигации при наличии полного количества разностно-дальномерных навигационных измерений;

– разработать рекомендации по областям применения и практической реализации систем управления подвижными объектами.

Объект исследования – системы управления беспилотными объектами.

Предмет исследования – методы аналитического синтеза систем управления беспилотными объектами на основе разностно-дальномерной навигационной информации.

Научная новизна

1. Разработана методика синтеза системы управления объектом методом аналитического конструирования агрегированного регулятора (АКАР), использующая для выработки команд управления сигнал рассогласования по информации от разностно-дальномерной радионавигационной системы (РДРНС) с применением полных уравнений кинематики объекта в эллиптической системе координат, которая *позволяет* получить квазиоптимальный нелинейный закон управления объектом по информации от РДРНС при уменьшенном числе навигационных позиций за счет выбора кинематической траектории специального вида.

2. Разработана методика синтеза системы управления методом аналитического конструирования оптимального регулятора (АКОР), использующая для выработки команд управления сигнал рассогласования по информации от РДРНС с применением линеаризованных уравнений кинематики объекта в эллиптической системе координат, которая *позволяет* получить упрощенный линейный закон управления объектом по информации от РДРНС при уменьшенном числе навигационных позиций за счет выбора кинематической траектории специального вида.

3. Разработана математическая модель кинематической обратной связи, заключающаяся в использовании эллиптической системы координат, что *обеспечивает* функционирование контура управления объектом по сигналу рассогласования в виде разности между требуемыми разностно-дальномерными навигационными параметрами, соответствующими местоположениям цели и объекта управления.

4. Разработана математическая модель устройства оценивания суммарной дальности до двух навигационных позиций на основе измерений разностно-дальномерной информации и доплеровских смещений частот навигационных сигналов, а также собственной скорости движения объекта, что *обеспечивает* как компенсацию динамической ошибки наведения объекта, так и стабилизацию коэффициента усиления системы управления.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика синтеза системы управления объектом методом АКАР, *отличающаяся* формированием команд управления на основе разностей временных задержек сигналов РДРНС для объекта и цели с использованием нелинейных уравнений кинематики объекта, выраженных в эллиптической системе координат, *позволяющая* синтезировать нелинейный контур управления объектом по информации от двухпозиционной РДРНС на плоскости при уменьшенном числе навигационных позиций (с трех до двух) за счет реализации кинематической траектории объекта в виде гиперболы.

2. Методика синтеза системы управления методом АКОР, *отличающаяся* формированием команд управления на основе разностей временных задержек сигналов РДРНС для объекта и цели с использованием линеаризованных уравнений кинематики объекта, выраженных в эллиптической системе координат, *позволяющая* синтезировать линейный контур управления объектом по информации от двухпозиционной РДРНС на плоскости при уменьшенном числе навигационных позиций (с трех до двух) за счет реализации кинематической траектории в виде гиперболы.

3. Математическая модель устройства измерения суммарной дальности до объекта в двухпозиционной РДРНС, *отличающаяся* способом формирования оценок, основанным на измерении доплеровских смещений частот навигационных сигналов, а также разностно-дальномерного параметра местоположения объекта, *позволяющая* оценить местоположение объекта при его движении вдоль гиперболы положения вблизи базы РДРНС.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты диссертационных исследований, включая научные результаты и положения, выносимые на защиту, получены соискателем лично. Основным соавтором публикаций является научный руководитель – кандидат технических наук В. Э. Маркевич, участвовавший в формировании целей и задач исследования, обсуждении результатов исследования, а также в оценке результатов, полученных методами оптимального синтеза систем радиоуправления, в частности, аналитического конструирования агрегированных регуляторов. Соавтором двух публикаций является кандидат технических наук, доцент С. А. Шабан, принимавший участие в обсуждении и верификации результатов, связанных с проектированием устройства оптимального радиоуправления. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X и XI Международных научно-практических конференциях авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» «Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации» (г. Минск, 2020, 2021 гг.); 9-й Международной научной конференции по военно-техническим проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения (MILEX, г. Минск, 2021 г.); 57-й и 58-й научных конференциях аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2021, 2022 гг.); XXVIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь» (г. Воронеж, Россия, 2022 г.), а также на семинаре в НИИ Вооруженных Сил Республики Беларусь «Проблемные вопросы разработки, испытаний, эксплуатации вооружения и военной техники» (г. Минск, 2022 г.).

Использование результатов диссертации подтверждено двумя актами внедрения в производство на предприятиях ОАО «АЛЕВКУРП» и РПУП «Завод точной электромеханики».

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликована 21 научная работа, в том числе 11 статей в научных рецензируемых журналах, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, объемом 6,27 авторского листа, 4 статьи в сборниках трудов научных конференций объемом 1,68 авторского листа, 6 тезисов докладов в сборниках материалов международных и республиканских научно-технических конференций. Общий объем публикаций составляет 7,95 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 90 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 21 наименования. Общий объем – 189 страниц, в том числе 62 рисунка на 57 страницах, 8 таблиц на 8 страницах, 2 приложения на 18 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении показана актуальность темы диссертации, обоснованы цель, объект и предмет диссертационной работы.

В **первой главе** отражены основные принципы работы разностно-дальномерных навигационных систем, указаны возможные ситуации наведения управляемых объектов по данным разностно-дальномерной навигационной системы с использованием неполного объема навигационных измерений (с отсутствием сигнала от одной из навигационных позиций). Описана типовая структура контура наведения объекта, основные методы наведения, методы построения систем автоматического управления. Приведены достоинства и недостатки данных методов. Предложена реализация наведения объекта на основе разностно-дальномерной информации при неполном объеме навигационных измерений за счет формирования сигнала рассогласования ε контура управления объекта отличным от традиционных методов способом, а именно – на основе разности $\varepsilon = \Delta\tau = \tau_{ц} - \tau$, где $\tau_{ц} = (d_{ц1} - d_{ц0})/b$ – разностно-дальномерный параметр цели; $\tau = (d_1 - d_0)/b$ – разностно-дальномерный параметр объекта. Необходимость введения такого сигнала ошибки вызвана тем, что при наличии оценки только одного разностно-дальномерного параметра объекта невозможно вычислить его декартовы или другие координаты для того, чтобы сформировать сигнал ошибки, используемый в таких распространенных методах наведения, как метод пропорциональной навигации (ПН) и метод погони. На рисунке 1 проиллюстрировано положение беспилотного летательного аппарата (БЛА) и цели, имеющие соответствующие параметры τ, τ_0 в разностно-дальномерной навигационной системе, образованной пунктами Π_0, Π_1 .

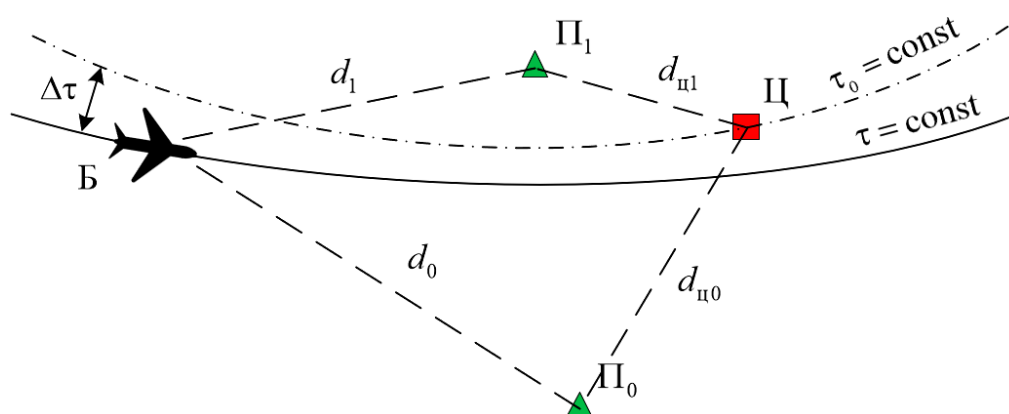


Рисунок 1 – Расположение БЛА (Б), цели (Ц) и двух навигационных позиций (Π_0, Π_1) на плоскости

Данный способ формирования сигнала рассогласования приводит к кинематической траектории данного метода наведения при $\varepsilon=0$ в виде гиперболы, проходящей через цель. Однако для реализации такого контура наведения необходимо замкнуть обратную связь между управляющим ускорением объекта и измеряемым им разностно-дальномерным параметром τ для решения задачи наведения на плоскости. Это приводит к необходимости определения данной кинематической связи перед решением задачи синтеза регулятора, реализующего закон $\lambda = \lambda(\Delta\tau, \dots)$ наведения по гиперболе в составе контура управления (рисунок 2).

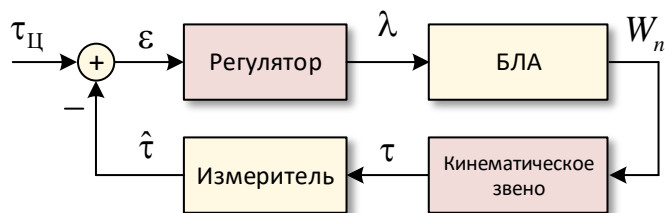


Рисунок 2 – Общий вид структурной схемы контура управления объектом

Во **второй главе** проведен анализ кинематической связи разностно-дальномерной информации с управляющими ускорениями объекта. Показано, что наиболее приемлемым вариантом является представление разностно-дальномерных измерений положения объекта в эллиптической системе координат, поскольку она имеет координатную линию в виде гиперболы, что соответствует линии положения объекта в разностно-дальномерной навигационной системе. На рисунке 3 представлено положение объекта Б с декартовыми координатами x, y в данной эллиптической системе координат с длиной базы $2c$.

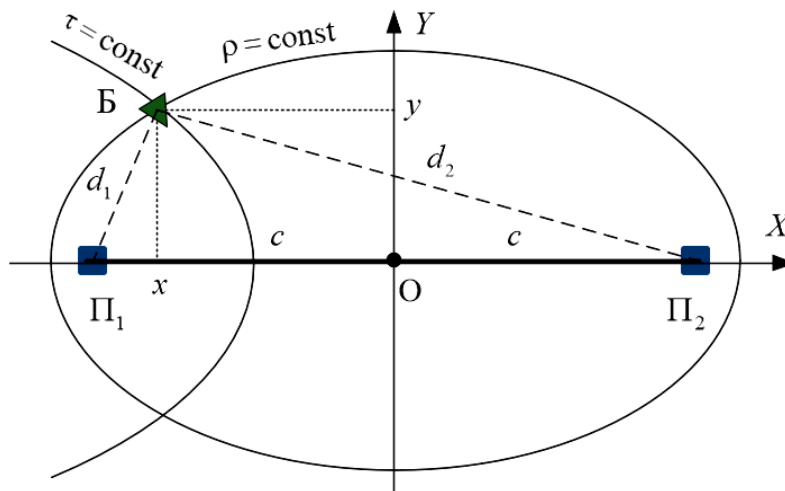


Рисунок 3 – Положение объекта в эллиптической системе координат

Параметры τ, ρ на рисунке 3 – эллиптические координаты объекта, при этом линия положения, задаваемая условием $\tau = \text{const}$, является гиперболой, а линия положения с условием $\rho = \text{const}$ – эллипсом. Связь декартовых и эллиптических координат описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} x &= c\rho\tau; \\ y &= \sqrt{c^2(\rho^2 - 1)(1 - \tau^2)}. \end{aligned} \quad (1)$$

Эллиптические координаты имеют простую линейную связь с дальностями d_1, d_2 между объектом и соответствующими навигационными позициями Π_1, Π_2 :

$$\rho = \frac{1}{2c}(d_1 + d_2); \quad \tau = \frac{1}{2c}(d_1 - d_2). \quad (2)$$

Используя коэффициенты Ламэ преобразования (1) и уравнение Лагранжа, получен закон, описывающий кинематическую связь между управляющим нормальным к траектории движения объекта ускорением W_n и эллиптическим разностно-дальномерным параметром τ при условии, что угол между вектором скорости объекта и касательной к гиперболе положения $\tau = \text{const}$ объекта мал:

$$\begin{aligned} W_n &= \frac{c}{(\rho^2 - 1)(\tau^2 - 1)^{3/2} \sqrt{\tau^2 - \rho^2}} [\tau\dot{\tau}(1 - 2\rho^2 + \rho^4) + \tau\rho^2 + \tau^3\dot{\rho}^2(\tau^2 - 2) + \\ &+ 2\tau\rho\dot{\rho}(\tau^2 - 1)(1 + \rho^2) + \ddot{\tau}\tau^2(1 - \tau^2 + \rho^2(\tau^2 - \rho^2)) + \ddot{\rho}\rho^2(\rho^2 - 1)]. \end{aligned} \quad (3)$$

В предположении того, что объект движется вблизи гиперболы, проходящей через цель, и что цель не располагается вблизи базы навигационной системы, где кривизна гиперболы положения цели наивысшая, получено упрощенное линейное выражение кинематической связи

$$W_n = c[2\dot{\rho}\dot{\tau} + \rho\ddot{\tau}]. \quad (4)$$

Выражение (4) подобно кинематической связи угломерной системы наведения, использующей метод трёх точек, поскольку по мере удаления от линии базы гипербола положения объекта приближается к асимптотической прямой угломерной системы.

В третьей главе приводятся методики синтеза устройства измерения разностно-дальномерного параметра τ и двух регуляторов, один из которых использует полный закон кинематической связи, а другой – упрощенный. Первый регулятор получен на основе метода АКАР, используя полное выражение кинематической связи (3). При этом считалось, что объект управления описывается единичной передаточной функцией. Такой подход широко применяется на практике, позволяя независимо синтезировать системы наведения и стабилизации объекта, и основан на том факте, что динамика системы стабилизации как правило оказывается более широкополосной в сравнении с динамикой контура, реализующего метод наведения. Представляя кинематическую связь (3) в пространстве состояния

$$\begin{aligned} \dot{\tau}_1 &= \tau_2; \\ \dot{\tau}_2 &= \frac{1}{\rho^2 - \tau^2} \left[\frac{\tau \dot{\rho}^2 (\tau^2 - 1)}{\rho^2 - 1} - 2\rho \dot{\rho} \dot{\tau} + \frac{\tau \dot{\tau}^2 (\rho^2 - 1)}{\tau^2 - 1} - \frac{W}{c} \sqrt{\tau^2 - 1} \sqrt{\tau^2 - \rho^2} \right], \end{aligned}$$

а также используя желаемую динамику контура управления в виде простейшей астатической динамической системы первого порядка

$$T_\psi \dot{\psi} + \psi = 0, \quad (5)$$

где $\psi = \dot{\tau} - (\tau_{ц} - \tau) / T_{ж}$; T_ψ – постоянная времени, получен следующий закон выработки управляющих ускорений объекта для движения по гиперболе:

$$\begin{aligned} W_n &= \frac{c}{\sqrt{(\tau^2 - 1)} \sqrt{\tau^2 - \rho^2}} \times \\ &\times \left[\frac{\tau \dot{\tau}^2 (\rho^2 - 1)}{\tau^2 - 1} + \frac{\tau \dot{\rho}^2 (\tau^2 - 1)}{\rho^2 - 1} - 2\rho \dot{\rho} \dot{\tau} + (\tau^2 - \rho^2) \left(\frac{(\tau_{ц} - \tau)}{T_{ж} T_\psi} + \frac{(\dot{\tau}_{ц} - \dot{\tau})}{T_{ж}} + \frac{\dot{\tau}}{T_\psi} \right) \right]. \quad (6) \end{aligned}$$

В соответствии с методом АКАР закон (6) стремится обеспечить такую динамику всей системы управления, которая представима в виде (5), удовлетворяя при этом функционалу качества вида

$$J_\Sigma = \int_0^\infty [m^2 \varphi^2(\psi) + c^2 \dot{\psi}^2] dt,$$

где m, c – множители, определяющие длительность переходных процессов, $\varphi(\psi)$ – некоторая функция (часто полагают $\varphi(\psi) = \psi$). Структурная схема полученного контура приведена на рисунке 4.

Также был синтезирован регулятор с использованием метода АКОР в постановке Лётова–Калмана для линеаризованной кинематической связи (4). В соответствии с данным методом производилась минимизация функционала качества вида

$$J = \int_0^{\infty} [q_1(\tau_{ц} - \tau)^2 + q_2(\dot{\tau}_{ц} - \dot{\tau})^2 + r\lambda^2] dt,$$

где q_1, q_2, r – соответствующие величинам $\tau, \dot{\tau}, \lambda$ коэффициенты штрафов.

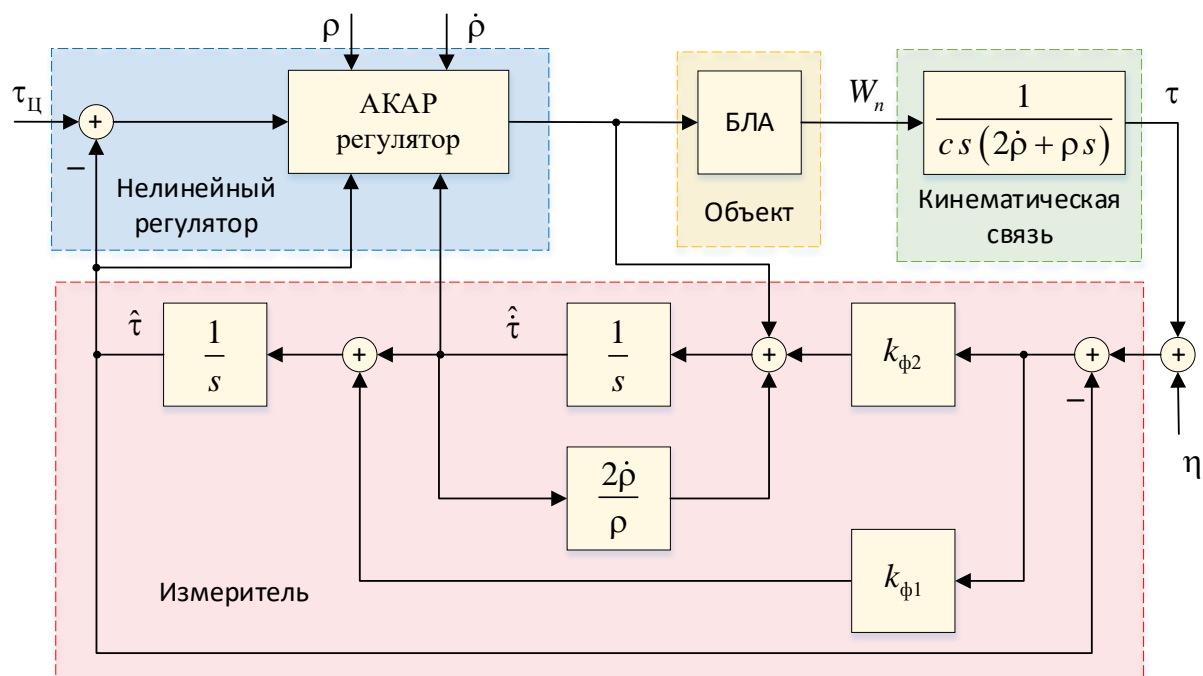


Рисунок 4 – Структурная схема контура управления, полученная методом АКОР

Синтезированный закон управления имеет вид пропорционально-дифференцирующего регулятора

$$W_n = c\rho [k_{s1}(\tau_{ц} - \tau) + k_{s2}(\dot{\tau}_{ц} - \dot{\tau})], \quad (7)$$

где $k_{s1} = \sqrt{\frac{q_1}{r}}$, $k_{s2} = \sqrt{\left(2\sqrt{\frac{q_1}{r}} + \frac{q_2}{r}\right)}$ – коэффициенты усиления;

$\omega_s = 4\sqrt{\frac{q_1}{r}}$ – резонансная частота цепи при коэффициенте затухания 0,707.

Структурная схема контура управления, полученного на основе (7), представлена на рисунке 5. Поскольку данный регулятор является линейным и синтезирован с использованием линейризованной обратной связи, движение объекта вблизи линии базы будет характеризоваться значительной величиной динамической ошибки наведения вдоль целевой гиперболы. Для устранения данной динамической ошибки был получен закон компенсирующего ускорения:

$$W_{\text{комп}} = \frac{c(\tau\dot{\tau}^2(\rho^2 - 1) + \tau\dot{\rho}^2(1 - \tau^2))}{(\rho^2 - 1)\sqrt{\rho^2 - \tau^2}\sqrt{1 - \tau^2}}. \quad (8)$$

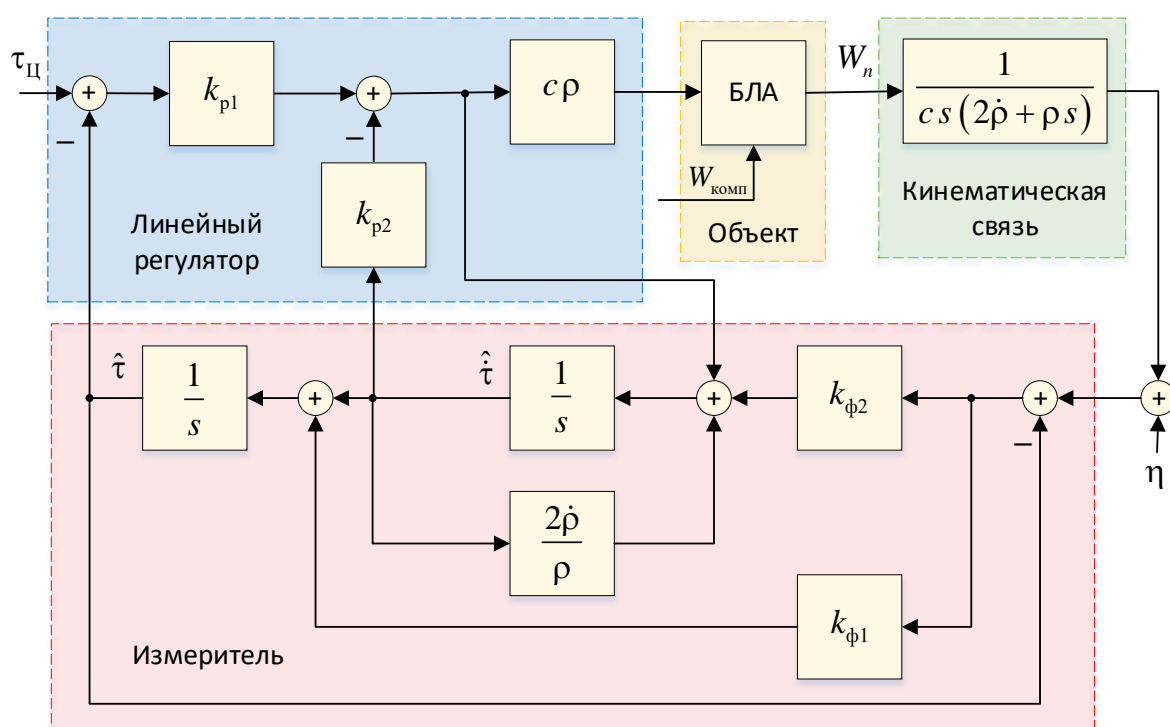


Рисунок 5 – Структурная схема контура управления, полученная методом АКОР

Для реализации полученных контуров управления с использованием (6)–(8) требуется оценка величины суммарно-дальномерного параметра ρ . В случае пассивной навигационной системы, где объект оснащен лишь приемником навигационной информации, отсутствует возможность оценить величину ρ напрямую с помощью выражения (2) и метода наименьших квадратов. Поэтому для данного случая был разработан способ косвенного оценивания параметра ρ , используя измерения радиальных скоростей движения объекта V_1, V_2 , соответствующих определенным доплеровским сдвигам частот принимаемых объектом навигационных сигналов от двух позиций, а также измерения собственной скорости движения V_0 и параметра τ . Данные величины отражены на рисунке 6.

На основании отношения скоростей $\frac{V_1}{V_0} = \cos \alpha_1$; $\frac{V_2}{V_0} = \cos \alpha_2$ может быть оценен угол $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$ визирования базы навигационной системы объектом.

Используя угол α , можно оценить углы φ_1, φ_2 визирования объекта с линии базы навигационной системы:

$$\cos \varphi_1 = \frac{\tau}{2} \left(1 + \cos \alpha + \sqrt{2} \operatorname{sgn} \tau \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2}{\tau^2} - \cos \alpha - 1} \right);$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{\tau}{2} \left(1 + \cos \alpha - \sqrt{2} \operatorname{sgn} \tau \sin \frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{2}{\tau^2} - \cos \alpha - 1} \right).$$

Зная углы $\alpha, \varphi_1, \varphi_2$, можно оценить параметр ρ с помощью выражения

$$\rho = \frac{\tau \cos \varphi_1 - 1}{\tau - \cos \varphi_1}.$$

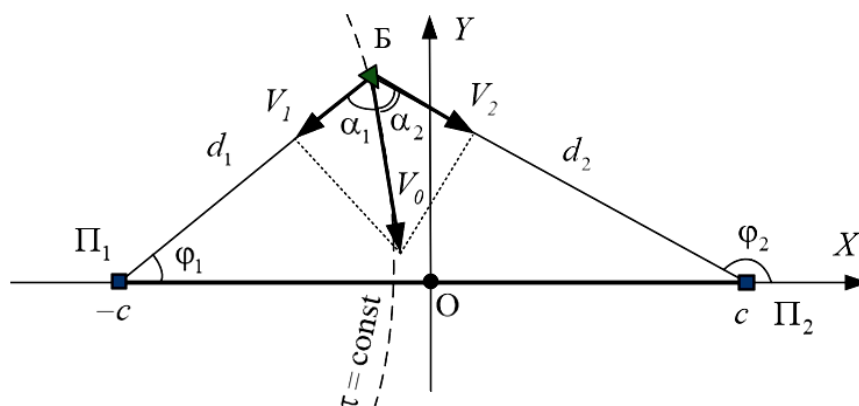


Рисунок 6 – Пояснение величин V_0, V_1, V_2 вектора скорости движения объекта

Параметр ρ может быть оценен с невысокой погрешностью только вблизи линии базы, где он не превышает 2–3 единиц, поскольку с ростом его значения дисперсия оценки стремительно возрастает вместе с остальными статистическими моментами более высоких порядков.

В **четвертой главе** приводятся результаты сравнения эффективности наведения объекта на цель с использованием регуляторов, синтезированных методами АКАР и АКОР в главе 3, а также регулятора на основе широко распространенного метода ПН. Реализация метода ПН в контуре управления объектом подразумевает использование двух разностно-дальномерных навигационных параметров от трех навигационных позиций для решения задачи наведения на плоскости.

На рисунках 7 приведены траектории движения объекта с использованием трех контуров управления при различном расположении точки цели. При этом траектория № 1 соответствует контуру управления, реализующему метод ПН, № 2 – контуру, основанному на методе АКАР, а № 3 – контуру, основанному на методе АКОР.

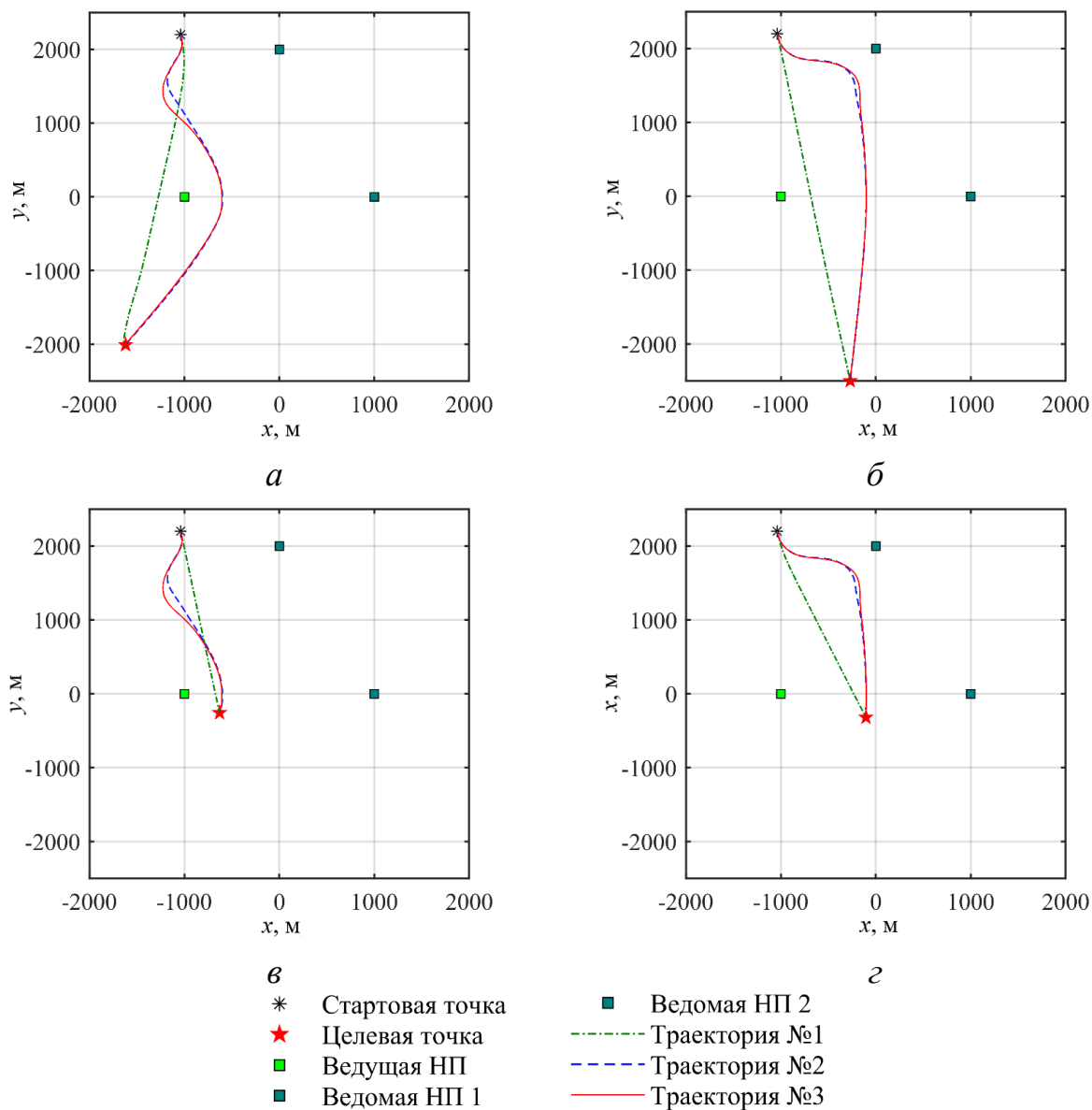


Рисунок 7 – Траектории движения объекта, полученные для различных контуров наведения и различных типовых ситуаций расположения точки цели

Эффективность работы данных контуров управления оценивалась с помощью следующих показателей качества: время движения к цели t_k , функция промаха $h = \sqrt{(x_{Ц} - x)^2 + (y_{Ц} - y)^2}$, средний квадрат управляющих ускорений $\bar{W}_t^2 = \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} W_n^2 dt$ и ошибка наведения $h_\delta = c\rho(\tau_{Ц} - \tau)$.

На рисунках 8 приведены зависимости от времени ошибок наведения для ПН- и АКАР-контуров управления (рисунок 8, а), для АКАР- и АКОР-контуров управления при отсутствии оценки суммарной дальности (рисунок 8, б), для АКАР- и АКОР-контуров управления при наличии оценки суммарной дальности ρ (рисунок 8, в).

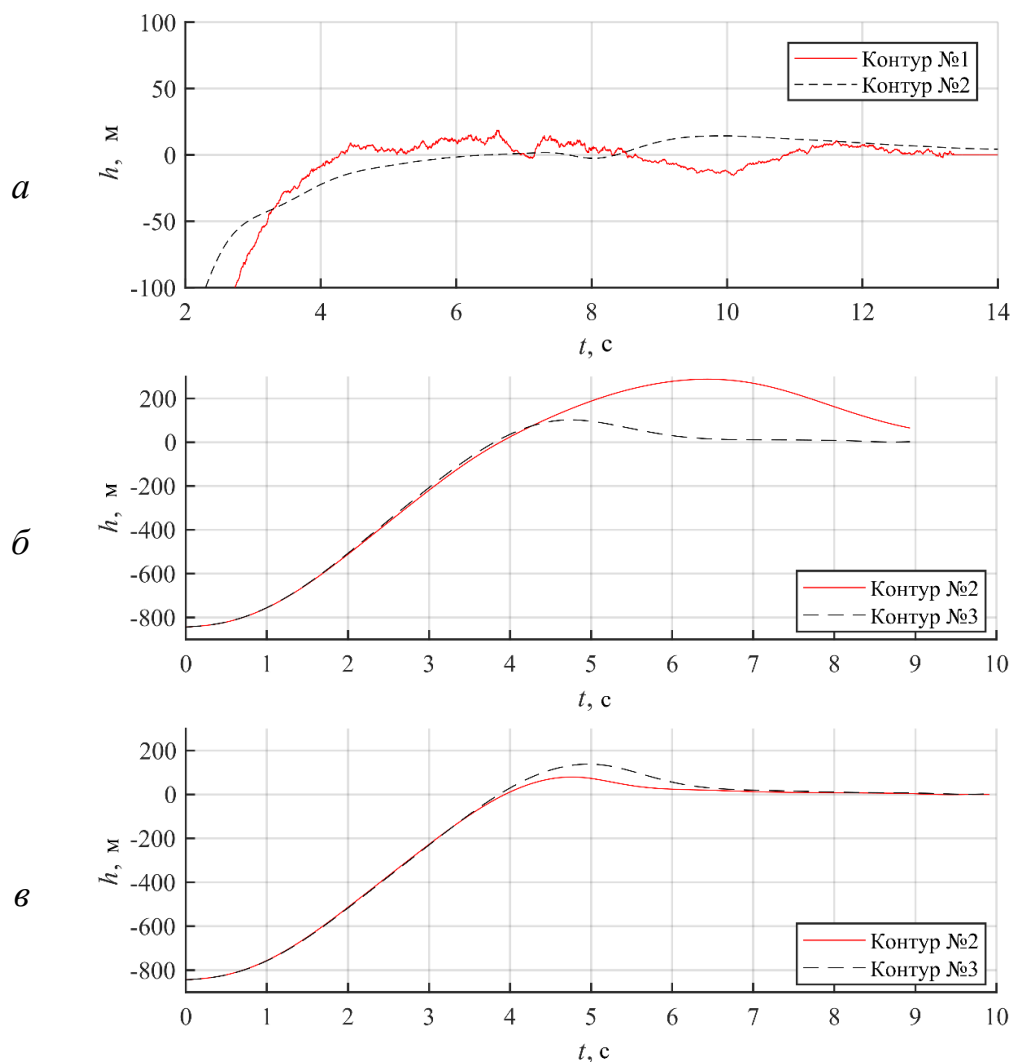


Рисунок 8 – Ошибки наведения исследуемых контуров управления объектом

Представленные результаты моделирования подтверждают работоспособность разработанных систем управления, реализующих наведение объекта на цель по гиперболе на основе информации от РДРНС. При этом удалось сократить требуемое количество навигационных позиций. Нелинейный контур управления № 2, основанный на методе АКАР, позволил получить более оптимальную траекторию движения объекта в сравнении с контуром № 3, обладая меньшей длительностью переходных процессов и меньшим перерегулированием при наличии измерений суммарной дальности. В случае отсутствия таких измерений лучшие результаты показал основанный на методе АКОР линейный контур управления № 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана математическая модель кинематики движения объекта в эллиптической системе координат на основе разностно-дальномерной навигационной информации о его местоположении для решения задачи синтеза автономной системы управления. Данная модель связывает управляющее ускорение объекта, определяющее изменение направления его движения при наведении на цель, и разностно-дальномерный параметр, основанный на использовании двух навигационных позиций. Введение эллиптической системы координат исключает необходимость применения дополнительных преобразований разностно-дальномерного навигационного параметра, позволяя использовать его напрямую для выработки сигнала ошибки в контуре управления объектом. Это дает возможность снизить минимально необходимый объем навигационной информации, требуемый для наведения объекта на цель на плоскости, используя только один разностно-дальномерный параметр вместо двух, что является отличительной особенностью от других систем управления, основанных на использовании разностно-дальномерной навигационной информации. Недостатком данного способа реализации обратной связи контура управления является более сложная и энергозатратная кинематическая траектория движения объекта в виде гиперболы. Было проведено упрощение кинематической связи и представлены её математические модели, имеющие различную сложность и степень точности. Сравнение моделей между собой на основе компьютерного моделирования показало достаточно высокую степень соответствия линеаризованных моделей исходной нелинейной [5–А; 6–А; 11–А; 14–А; 20–А].

2. Разработана методика синтеза нелинейной системы управления объектом на основе метода АКАР, отличительной особенностью которой является использование полной математической модели кинематической обратной связи разностно-дальномерной информации о местоположении объекта и его ускорений. На основе данной методики была получена математическая модель нелинейной системы управления объектом, которая позволила реализовать его наведение на цель вдоль гиперболы положения на плоскости с использованием только одного разностно-дальномерного параметра вместо двух, требуемых в рамках классической постановки задачи наведения объекта на цель с использованием разностно-дальномерных измерений [5–А; 6–А; 9–А; 12–А; 17–А].

3. Разработана методика синтеза линейной системы управления объектом на основе метода АКОР, отличительной особенностью которой

является использование упрощенной линейной математической модели кинематической обратной связи разностно-дальномерной информации о местоположении объекта и его ускорений. Была решена оптимизационная задача определения оптимальной структуры линейной системы управления в соответствии с заданным функционалом качества, что позволило получить математическую модель линейной системы управления объектом и реализовать его наведение на цель на плоскости с использованием только одного разностно-дальномерного параметра. Установлено, что отличия траекторий движения объекта, полученных для синтезированных методами АКОР и АКАР систем управления, являются несущественными. При этом линейный подход позволил получить более простой закон управления объектом, имеющий меньшую чувствительность к точности оценки суммарной дальности до объекта, а также уменьшить в типовых ситуациях среднее значение конечного промаха в 1,1–7,6 раза в сравнении с контуром, реализованным по методу АКАР без использования оценки суммарной дальности [3–А; 6–А; 10–А; 11–А; 12–А; 15–А; 17–А; 18–А; 21–А].

4. Разработана математическая модель устройства оценивания суммарной дальности до объекта на плоскости в двухпозиционной разностно-дальномерной навигационной системе, отличительной особенностью которой является использование измерений собственной скорости движения объекта, двух доплеровских смещений частот принимаемых им навигационных радиосигналов, а также одного разностно-дальномерного параметра без использования дальномерных навигационных измерений. Наличие оценки суммарной дальности позволило улучшить динамические характеристики контура управления, а также уменьшить в типовых ситуациях среднее значение конечного промаха для системы управления, реализованной по методу АКАР, в 1,2–9,5 раза в сравнении с системой управления на основе метода АКОР. Оценка суммарной дальности была использована для устранения перекрестной положительной обратной связи двух каналов управления при реализации системы управления объектом в пространстве. В работе также дано математическое описание способа устранения данной связи. Это позволило в дальнейшем реализовать пространственное наведение объекта на цель с использованием разработанных систем управления. Ограничением данного способа оценивания суммарной дальности является невозможность его использования вдали от навигационных позиций. Было выполнено математическое описание способа компенсации динамической ошибки наведения, основанного на использовании разностно-дальномерного параметра объекта и его суммарной дальности в двухпозиционной разностно-дальномерной навигационной системе. Предложенный подход позволил снизить динамическую ошибку,

возникающую при движении объекта к цели по криволинейной траектории в виде гиперболы [7–А; 8–А; 13–А; 16–А; 19–А, 21–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные в ходе данной диссертационной работы результаты позволяют реализовать наведение объекта в заданную точку пространства на основе использования разностно-дальномерной информации при ограниченном числе навигационных позиций. Разработанные системы управления позволяют использовать только три навигационные позиции в трехмерном случае и две – в двумерном случае при наведении объекта на цель. Это может быть использовано для наведения объектов по информации от существующих наземных и спутниковых навигационных систем при выходе из строя части навигационных позиций или неблагоприятной помеховой обстановке. При этом реализация контура управления на основе метода АКАР предпочтительна при наличии оценки дальности до объекта. При отсутствии такой оценки целесообразно использовать контур управления на основе метода АКОР. Полученные результаты могут учитываться при модернизации существующих или разработке новых систем навигации беспилотных транспортных средств, а также гибридных бортовых навигационных систем, включающих коррекцию на конечном участке траектории показаний инерциальной навигационной системы при временном срыве слежения за навигационными сигналами [2–А; 3–А; 4–А; 17–А].

Коррекция траектории движения по данным навигационных измерений ограниченного объема на основе полученных автором результатов может быть использована в условиях, когда реализация полноценной навигационной сети затруднена в силу её высокой стоимости, например, при наведении высокоточных средств поражения наземных целей по сигналам радиомаяков или при навигации автономных подводных аппаратов [1–А; 11–А; 20–А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Легкоступ, В. В. Повышение точности оценивания координат объекта в многопозиционной радиолокационной системе с приемным пунктом воздушного базирования / В. В. Легкоступ, В. Э. Маркевич // Докл. БГУИР. – 2018. – № 2. – С. 5–11.

2–А. Маркевич, В. Э. Модифицированный метод пропорционального наведения при ограниченном секторе сопровождения объекта управления /

В. Э. Маркевич, В. В. Легкоступ // Информатика. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 71–92.

3–А. Маркевич, В. Э. Аналитическое проектирование устройства управления ракетой для перехвата аэродинамической цели / В. Э. Маркевич, В. В. Легкоступ // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2019. – № 1. – С. 41–49.

4–А. Маркевич, В. Э. Наведение сверхзвукового управляемого объекта в многопозиционной радиолокационной станции воздушного базирования / В. Э. Маркевич, В. В. Легкоступ // Информатика. – 2020. – Т. 17, № 2. – С. 120–138.

5–А. Легкоступ, В. В. Уравнения кинематики беспилотного летательного аппарата в эллиптической системе координат при наведении по разностно-дальномерной навигационной информации / В. В. Легкоступ, В. Э. Маркевич // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 1. – С. 12–20.

6–А. Легкоступ, В. В. Методика определения кинематической связи между управляющим летательным аппаратом ускорениями и его эллиптическими координатами в альтернативном представлении / В. В. Легкоступ // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 3. – С. 15–24.

7–А. Легкоступ, В. В. Методика определения дальности до объекта в разностно-дальномерной навигационной системе по доплеровским смещениям частоты / В. В. Легкоступ, В. Э. Маркевич // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 4. – С. 40–46.

8–А. Легкоступ, В. В. Методика определения статистических характеристик оценки дальности по доплеровским смещениям частоты / В. В. Легкоступ // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2022. – № 1. – С. 20–26.

9–А. Легкоступ, В. В. Методика получения закона управления с использованием синергетического подхода для задачи наведения летательного аппарата вдоль гиперболы / В. В. Легкоступ, В. Э. Маркевич, С. А. Шабан // Докл. БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 2. – С. 30–38.

10–А. Легкоступ, В. В. Методика синтеза устройства управления по методу аналитического конструирования оптимального регулятора для задачи наведения летательного аппарата вдоль гиперболы / В. В. Легкоступ, С. А. Шабан, В. Э. Маркевич // Докл. БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 65–72.

11–А. Легкоступ, В. В. Облик мобильной навигационной системы воздушного базирования / В. В. Легкоступ, В. Э. Маркевич // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2022. – № 1. – С. 56–63.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

12–А. Легкоступ, В. В. Оптимальное наведение БЛА с использованием разностно-дальномерной навигационной системы в условиях недостаточного объема навигационной информации / В. В. Легкоступ // Сб. материалов 9-й Междунар. науч. конф. по воен.-техн. проблемам, проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 23–26 июня 2021 г. – Минск : Звезда, 2021. – С. 5–9

13–А. Легкоступ, В. В. Способ оценивания суммарной дальности в бистатической разностно-дальномерно-доплеровской навигационной системе / В. В. Легкоступ // Радиотехника и электроника : материалы 58-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, апрель 2022 г. – Минск, 2022. – С. 114–132.

14–А. Легкоступ, В. В. Определение передаточной функции кинематической связи между ускорениями летательного аппарата и его разностно-дальномерной информацией / В. В. Легкоступ // Радиолокация, навигация и связь : материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти Б. Я. Осипова : в 6 т. – Воронеж, 27–29 сент. 2022 г. – Воронеж : Изд. дом ВГУ, 2022. – Т. 4. – С. 107–117.

15–А. Легкоступ, В. В. Синтез устройства управления по методу Лётова – Калмана для наведения летательного аппарата вдоль гиперболы положения / В. В. Легкоступ // Радиолокация, навигация и связь : материалы XXVIII Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. памяти Б. Я. Осипова : в 6 т. – Воронеж, 27–29 сент. 2022 г. – Воронеж : Изд. дом ВГУ, 2022. – Т. 4. – С. 172–180.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

16–А. Легкоступ, В. В. Увеличение точности измерения координат в многопозиционной РЛС при подъеме позиции над землей / В. В. Легкоступ, В. Э. Маркевич // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы 13-й Междунар. молодеж. науч.-техн. конф. – Севастополь : СевГУ, 2017. – С. 78.

17–А. Легкоступ, В. В. Разработка автономной навигационной системы для коррекции траектории полета БЛА / В. В. Легкоступ, В. Э. Маркевич // Проблемы обеспечения военной безопасности государства в современных условиях : тез. докл. Междунар. воен.-науч. конф., Минск, 17–18 апр. 2019 г. – Минск : Воен. акад. Респ. Беларусь, 2019. – С. 269.

18–А. Легкоступ, В. В. Метод наведения летательного аппарата по гиперболе / В. В. Легкоступ // Актуальные вопросы науки и техники в сфере развития авиации : тез. докл. XI Междунар. науч.-практ. конф.

авиацион. фак. Воен. акад. Респ. Беларусь, Минск 21 мая, 2021 г. – Минск :
Воен. акад. Респ. Беларусь, 2021. – С. 138.

19–А. Легкоступ, В. В. Оценка дальности до БЛА на основе измерений доплеровских сдвигов частот в бистатической разностно-дальномерной навигационной системе / В. В. Легкоступ // Радиотехника и электроника : материалы 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, апр. 2021 г. – Минск, 2021. – С. 51–52.

20–А. Легкоступ, В. В. Сценарии навигации в разностно-дальномерных системах при недостатке навигационных данных / В. В. Легкоступ // Радиотехника и электроника : материалы 58-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, апр. 2022 г. – Минск, 2022. – С. 132–134.

21–А. Легкоступ, В. В. Компенсация динамической ошибки для движения управляемого средства вдоль гиперболы / В. В. Легкоступ // Радиотехника и электроника : материалы 58-й науч. конф. аспирантов, магистрантов, студентов БГУИР, Минск, апр. 2022 г. – Минск, 2022. – С. 134–135.



РЭЗІЮМЭ

Легкаступ Віктар Валер'евіч

Кіраванне рухомым аб'ектам па дадзеных рознасна-дальнамернай навігацыйнай сістэмы пры няпоўным аб'ёме вымярэнняў

Ключавыя словы: сістэма кіравання, метады навадзення, аналітычнае канструяванне аптымальнага рэгулятара, аналітычнае канструяванне аграгаванага рэгулятара, навігацыйная сістэма

Мэта работы: павышэнне эфектыўнасці функцыянавання сістэм аўтаномнага кіравання рухомымі аб'ектамі на аснове рознасна-далямернай інфармацыі ва ўмовах абмежаванага ліку якія перадаюць навігацыйных пазіцый.

Метады даследавання: тэорыя сінтэзу аптымальных сістэм кіравання, дыферэнцыяльная геаметрыя, матэматычная статыстыка, матэматычнае і камп'ютарнае мадэляванне.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанаваны спосаб пабудовы сістэмы кіравання для навадзення аб'екта на мэту па гіпербалічнай траекторыі з выкарыстаннем сігналу разузгаднення паміж рознасна-дальнамернымі параметрамі аб'екта і мэты, заснаванымі на вымярэнні рознасці далёкасцяў да двух навігацыйных пазіцый на плоскасці; атрыманы поўныя і лінеарызаваныя аналітычныя выразы зваротнай сувязі контуру кіравання ў эліптычнай сістэме каардынат, які выкарыстоўвае сігнал разузгаднення на аснове вымеранага рознасна-дальнамернага параметра аб'екта; прапанаваны спосаб ацэньвання сумарна-дальнамернага параметру аб'екта, які рухаецца па гіпербалічнай траекторыі ў бістатычнай навігацыйнай сістэме, на аснове вымярэнняў доплераўскіх зрухаў частаты навігацыйных сігналаў і ўласнай хуткасці руху; пацверджана працаздольнасць атрыманых контураў навадзення па гіпербалічнай траекторыі з выкарыстаннем камп'ютарнага мадэлявання, а таксама распрацаваны рэкамендацыі па іх практычнаму прымяненню.

Рэкамендацыі па выкарыстанню: распрацаваныя спосабы, мадэлі і метадыкі даследавання іх эфектыўнасці могуць быць выкарыстаны пры стварэнні перспектыўных і мадэрнізацыі існуючых сістэм кіравання аб'ектамі з выкарыстаннем рознасна-дальнамерных вымярэнняў для забеспячэння навадзення аб'ектаў ва ўмовах адсутнасці сігналу адной з навігацыйных пазіцый.

Вобласць ужывання: праектаванне сістэм кіравання і навадзення.

РЕЗЮМЕ

Легкоступ Виктор Валерьевич

Управление подвижным объектом по данным разностно-дальномерной навигационной системы при неполном объеме измерений

Ключевые слова: система управления, метод наведения, аналитическое конструирование оптимального регулятора, аналитическое конструирование агрегированного регулятора, навигационная система

Цель работы: повышение эффективности функционирования систем автономного управления подвижными объектами на основе разностно-дальномерной информации в условиях ограниченного числа передающих навигационных позиций.

Методы исследования: теория синтеза оптимальных систем управления, дифференциальная геометрия, математическая статистика, математическое и компьютерное моделирование.

Полученные результаты и их новизна: предложен способ построения системы управления для наведения объекта на цель по гиперболической траектории с использованием сигнала рассогласования между разностно-дальномерными параметрами объекта и цели, основанными на измерении разности дальностей до двух навигационных позиций на плоскости; получены полные и линеаризованные аналитические выражения обратной связи контура управления в эллиптической системе координат, использующего сигнал рассогласования на основе измеренного разностно-дальномерного параметра объекта; предложен способ оценивания суммарной дальности до объекта, движущегося по гиперболической траектории в бистатической навигационной системе, на основе измерений доплеровских сдвигов частоты навигационных сигналов и собственной скорости движения; подтверждена работоспособность полученных контуров управления движением объекта по гиперболической траектории с использованием компьютерного моделирования, разработаны рекомендации по их практическому применению.

Рекомендации по использованию: разработанные способы, модели и методики исследования их эффективности могут быть использованы при создании перспективных и модернизации существующих систем управления объектами с применением разностно-дальномерных измерений для обеспечения наведения объектов в условиях отсутствия сигнала одной из навигационных позиций.

Область применения: проектирование систем управления и наведения.

SUMMARY

Legkostup Viktor Valerievich

Vehicle control using time difference of arrival information in conditions of lack of full set of measurements

Keywords: control system design, guidance method, analytical design of optimal controller, analytical design of aggregated controller, navigation system

Purpose of the work: enhancing the efficiency of the control system for vehicles based on time difference of arrival information in conditions of a limited number of transmitting navigation positions.

Research methods: theory of optimal control system design, differential geometry, mathematical statistics, mathematical and computer simulation.

The results obtained and their novelty: a method for implementing a control system for guiding an object to the target along a hyperbolic trajectory using the error signal based on time difference of arrivals of navigation signals for the object and the target was proposed: complete and linearized analytical expressions for the feedback of the control loop in an elliptical coordinate system, using the error signal based on the time difference of arrival of navigation signals of the object was obtained; a method for estimating the total time of arrival for the object moving along a hyperbolic trajectory in a bistatic navigation system, based on measurements of Doppler shifts of navigation signals and speed of the object was proposed; the operability of the obtained control systems of object guidance along a hyperbolic trajectory was confirmed by computer simulation, as well as recommendations for their practical application were developed.

Recommendations for use: the developed techniques, models, as well as their efficiency studying methods, can be used to create or upgrade systems for objects control using time difference of arrival measurements to ensure object guidance in the absence of a signal from one position of the navigation system.

Scope: design of control and guidance systems.

Научное издание

ЛЕГКОСТУП
Виктор Валерьевич

**УПРАВЛЕНИЕ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ ПО ДАННЫМ
РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ
ПРИ НЕПОЛНОМ ОБЪЕМЕ ИЗМЕРЕНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.01 – системный анализ, управление
и обработка информации (промышленность)

Подписано в печать . Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз. Заказ .

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования «Белорусский
государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/238 от 24.03.2014,
2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск.