

ТОКАРЬ Аркадий Дмитриевич

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПО КОМБИНИРОВАННОМУ КРИТЕРИЮ
КАЧЕСТВА АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ПРИ
МАНЕВРЕ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Специальность: 05.13.01 –
“Системный анализ, управление и обработка информации (технические
системы)”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Рязань 2010

Работа выполнена в ГОУВПО «Рязанский государственный
радиотехнический университет»

Научный руководитель – Заслуженный работник высшей школы,
доктор технических наук, профессор
Кириллов Сергей Николаевич

Официальные оппоненты – Доктор технических наук, доцент
Клочко Владимир Константинович

– Кандидат технических наук
Горкин Владимир Николаевич

Ведущая организация ФГУП «КБМ» г. Коломна

Защита состоится «17» декабря 2010 г. в 12 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.211.01 в ГОУВПО Рязанском
государственном радиотехническом университете по адресу 390005,
г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО РГРТУ.

Автореферат разослан «11» ноября 2010г.

Отзыв на автореферат с подписью, заверенной печатью, просьба направлять в
ГОУВПО РГРТУ по указанному адресу.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.211.01

кандидат технических наук _____ В.Н. Пржегорлинский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка ранее известных, а также синтез и анализ новых методов наведения неразрывно связаны с развитием математического аппарата теории оптимального управления. Алгоритмы этой теории позволяют для системы, описываемой дифференциальными уравнениями, синтезировать сигнал управления, оптимальный по минимуму выбранного функционала качества.

Основополагающие работы по принципам оптимизации процесса управления были сделаны как отечественными учеными – А.М. Летовым, Л.С. Понтрягиным, В.А. Вейцелем, Я.З. Цыпкиным, Р.В. Гамкредидзе и др., так и зарубежными – А.С. Локком, Р. Айзексом, А.Брайсоном, Хо – Юши, Р.Беллманом и др. В более поздних работах российскими учеными В.И. Меркуловым, В.Н. Лепиным, В.В. Дрогалиным, О.Ф. Самариным, В.П. Харьковым кроме уже существующих были изложены современные методы синтеза алгоритмов оптимального перемещения объекта управления (ОУ), основанные на представлении процессов и систем в многомерном пространстве состояний.

Использование в качестве средств нападения высокоманевренных летательных аппаратов (ЛА), изготовленных по технологии “стелс”, высокоточного оружия, а также массированного применения помех различных типов вынуждает разработчиков постоянно совершенствовать ракетное оружие. Требования к перспективным головкам самонаведения (ГСН) в значительной степени определяются характеристиками и тактикой использования будущих высокоманевренных ЛА.

Зарубежные фирмы – начали вести новые разработки, а также стали проводить существенную модернизацию разработанных ранее ГСН. Разработка нового поколения ГСН ведется и в РФ.

Одними из основных проблем, которые приходится решать при создании ГСН являются:

- 1 Обеспечение высокой точности наведения ОУ на перспективные высокоманевренные ЛА.

- 2 Выполнение требований по минимизации массогабаритных характеристик.

В свою очередь, ошибки наведения ОУ в значительной степени определяются следующими факторами:

- 1 Несовершенством используемых методов траекторного управления.
- 2 Несоответствием динамических свойств ОУ и ЛА.
- 3 Погрешностями измерений и оценивания требуемых технических характеристик ОУ и ЛА.
- 4 Ошибками вычислений команд управления.
- 5 Чувствительностью алгоритмов функционирования к точности выдерживания параметров и измерению условий функционирования.

Таким образом, от выбора метода траекторного управления объектом в

значительной степени будет зависеть вероятность поражения ЛА. Используемые в настоящее время методы перемещения ОУ не в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям по перехвату высокоскоростных, интенсивно маневрирующих ЛА. Следовательно, актуальной задачей является разработка алгоритмов управления объектом оптимальных по комбинированному критерию качества «точность – энергетические затраты на управление», где под энергетическими затратами на управление понимают значения требуемых поперечных ускорений необходимых для управления объектом. Такие алгоритмы позволяют совместно повысить точность, уменьшить время наведения и требуемые перегрузки ОУ.

Цель и задачи работы. Основной целью работы является синтез и обоснование применения алгоритма управления объектом, реализованного на основе комбинированного функционала качества, позволяющего повысить точность, уменьшить требуемые поперечные ускорения, а также время наведения на маневрирующий ЛА.

Поставленная цель работы достигается решением следующих основных задач:

1 Синтез и исследование алгоритма управления объектом, полученного на основе комбинированного функционала качества.

2 Определение состава информационно – вычислительной системы (ИВС) с учетом синтезированного алгоритма перемещения ОУ.

3 Обоснование возможных путей определения параметров для полученного алгоритма перемещения ОУ.

4 Проведение имитационного моделирования, позволяющего:

- сравнить полученный алгоритм с ранее известными алгоритмами самонаведения;

- выявить особенности функционирования полученного алгоритма самонаведения ОУ в различных ситуациях маневрирования ЛА.

5 Рассмотрение дифференциальной игры поведения ОУ и ЛА, где в качестве критерия качества взят минимаксный конечный промах с учетом энергетических затрат на управление.

6 Синтез на основе теории дифференциальных игр оптимальных стратегий поведения ОУ и ЛА, обеспечивающих минимакс конечного промаха с учетом энергетических затрат на управление.

7 Комплексный анализ практической реализации полученного алгоритма самонаведения ОУ на современной элементной базе.

Методы проведения исследований. В работе использовались методы теории дифференциального, интегрального, матричного, вариационного исчисления, теории оптимального управления, математические методы классической механики, теории дифференциальных игр, численные методы вычислительной математики. Данные теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования.

Научная новизна. В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты

1 Синтезирован алгоритм перемещения ОУ на интенсивно маневрирующий ЛА по комбинированному критерию минимума квадрата сигнала ошибки и минимума квадрата производной сигнала ошибки.

2 Предложена методика определения параметров для полученного алгоритма ОУ в зависимости от интенсивности маневра и скорости полета ЛА, позволяющая уменьшить время наведения, а также требуемые перегрузки ОУ по сравнению с ранее известными алгоритмами самонаведения.

3 Получены оптимальные стратегии поведения ОУ и ЛА, при которых обеспечивается минимаксный конечный промах с учетом энергетических затрат на управление.

Практическая ценность работы. Синтезированный в работе алгоритм перемещения ОУ и методика определения параметров этого алгоритма могут быть использованы при проектировании перспективных автоматических систем управления при наведении ОУ на интенсивно маневрирующий ЛА. Варьирование параметрами синтезированного алгоритма наведения дает возможность достаточно просто и плавно перераспределять приоритеты в управлении между обеспечением требуемого поперечного ускорения и допустимыми промахами ОУ. Реализация результатов исследований позволит повысить робастность траектории полета ОУ при различных маневрах ЛА, что обеспечит улучшение показателей качества всего контура управления в целом.

Результаты диссертационной работы нашли применение в разработках НППЗ завода «Красное знамя», а также в учебном процессе Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский Государственный радиотехнический университет».

Основные положения, выносимые на защиту.

1 Алгоритм перемещения ОУ, реализованный на основе комбинированного критерия качества, позволяющий уменьшить значение текущего промаха на 15...20%, а также требуемые значения поперечного ускорения на 10...15% по сравнению с традиционными методами, при наведении на интенсивно маневрирующий ЛА.

2 Методика выбора способа определения весового коэффициента для предложенного алгоритма траекторного управления в зависимости от интенсивности маневра, а также скорости полета ЛА обеспечивающая, уменьшение требуемых поперечных ускорений на 10...15%, а также время полета на 5...8% в процессе наведения на маневрирующий ЛА.

3 Процедура оптимизации синтезированного алгоритма перемещения ОУ, на основе теоретико – игрового подхода, обеспечивающая уменьшение требуемых поперечных ускорений на 30...50% при маневрах ЛА «змейка», «кобра Пугачева», «пикирование под зону поражения ОУ» и «колокол».

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1 Четырнадцатая МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Рязань, 2005.

2 Двенадцатая Всероссийская НТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Рязань, 2007.

3 Тридцать вторая Всероссийская НТК «Сети, системы связи и телекоммуникации» Рязань, 2007.

4 Пятнадцатая МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» Рязань, 2008.

5 Тридцать третья Всероссийская НТК «Сети, системы связи и телекоммуникации» Рязань, 2008.

6 Тринадцатая Всероссийская НТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» РГРТУ. Рязань, 2008.

7 Тридцать четвертая Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные и телекоммуникационные технологии» Рязань, 2009.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, из них – 4 статьи из списка изданий, рекомендованных ВАК РФ, 7 тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 145 наименований и 7-ми приложений. Диссертация содержит 232 с., в том числе 169 с. основного текста, 5 таблиц и 72 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и решаемые в работе задачи. Изложены новые научные результаты, полученные в работе, показаны ее практическая ценность и апробация. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ основных алгоритмов, применяемых при самонаведении: параллельного сближения, пропорционального наведения (МПН), погони. Показано, что в рассмотренных ранее законах траекторного управления не учитывались резкие изменения параметра рассогласования во время наведения ОУ на маневрирующий ЛА. В процессе таких маневров возможны случаи, когда первая производная от ошибки сопровождения может принимать достаточно большие значения. По этой причине целесообразно использовать не только быстрый, но и плавный, без резких колебаний, закон управления. То есть квадратичный функционал, для текущего времени, следует дополнить условием минимума квадрата производной сигнала ошибки.

Исходя из требований к кинематической траектории полета ОУ, рассмотрена вариационная задача минимизации функционала:

$$I(\omega, \dot{\omega}, t) = \int_0^{t_p} (\alpha(\omega_{pm}(t) - \alpha(t))^2 \dot{D}^2(t) + (1 - \alpha)((\omega_{pm}(t) - \alpha(t))')^2 D^2(t)) dt \rightarrow \min, \quad (1)$$

где $D, \dot{D}$ – дальность и скорость сближения между ОУ и ЛА; ω_{pm}, ω – требуемое и текущее значения угловой скорости вращения линии визирования (ЛВ) ОУ–ЛА; $\alpha \in [0, 1[$ – безразмерный весовой коэффициент.

В результате синтеза, по комбинированному критерию качества, получены:

1 Закон изменения угловой скорости ЛВ:

$$\omega(t) = \omega_0 (D(t) / D_0)^{(\kappa-1)/2} (1 - (D_\kappa / D(t))^\kappa), \quad (3)$$

где $\kappa = \sqrt{1 + 4(\alpha / (1 - \alpha))}$, D_0 – начальное значение дальности между ОУ и ЛА, D_κ – дальность окончания наведения, ω_0 – начальное значение угловой скорости вращения ЛВ ОУ–ЛА.

2 Закон изменения требуемого значения поперечного ускорения ОУ:

$$\hat{J}_{pm} = \hat{J}_u + \hat{V}_{c\sigma} \hat{\omega}_0 \left(\hat{D} / \hat{D}_0 \right)^{(\kappa-1)/2} ((\kappa + 3) / 2), \quad (4)$$

где $\hat{J}_u$ – текущее значение нормального ускорения ЛА; $\hat{V}_{c\sigma}$ – скорость сближения ОУ и ЛА.

3 Закон изменения текущего промаха ОУ при использовании синтезированного алгоритма наведения

$$h(t) = (D^2(t) / \dot{D}) \omega_0 (D(t) / D_0)^{((\kappa-1)/2)} (1 - D_\kappa / D(t))^\kappa. \quad (5)$$

4 Алгоритм траекторного управления ОУ:

$$\Delta = \hat{J}_{pm} - \hat{J}_p = \hat{J}_u + \hat{V}_{c\sigma} \hat{\omega} ((3 + \sqrt{1 + 4(\alpha / (1 - \alpha))}) / 2) - \hat{J}_p, \quad (6)$$

где $\hat{J}_p$ – значение нормального ускорения ОУ.

С учетом полученного алгоритма траекторного управления (6) в состав ИВС кроме известных элементов, таких как вычислитель параметров рассогласования, устройство поиска, приема и селекции сигналов, устройство оптимального оценивания значений всех фазовых координат перемещения ОУ и ЛА должны входить и новые элементы:

1 Модуль обработки информации, который на основе полученного алгоритма перемещения ОУ формирует оценку требуемого поперечного ускорения ОУ $\hat{J}_{pm}$.

2 Устройство формирования коэффициента α , которое на основании оценок скорости сближения $\hat{V}_{c\sigma}$, начальной и текущей дальности $\hat{D}_0, \hat{D}$, начального значения угловой скорости вращения ЛВ $\hat{\omega}_0$ и поперечных ускорений ОУ $\hat{J}_p$ и ЛА $\hat{J}_u$ вычисляет необходимое значение весового коэффициента α .

Результаты анализа законов изменения угловой скорости ЛВ (3) и требуемого значения поперечного ускорения ОУ (4) показали, что если в

полученном алгоритме управления (6) увеличивать значение коэффициента α , то для его реализации, согласно выражению (4), требуются большие значения поперечных ускорений. Вследствие этого траектория полета ОУ увеличивает свою крутизну, по сравнению с траекториями для небольших значений коэффициента α . Однако на конечном этапе управления значение промаха, задаваемое выражением (5), уменьшается на 60...70%. Таким образом, изменяя значение весового коэффициента α можно перераспределять приоритеты в управлении между обеспечением требуемого поперечного ускорения и допустимыми промахами ОУ.

Исходя из требований, которые налагаются на траекторию полета ОУ, а также способности совершать ЛА всевозможные виды маневра, предложены следующие способы определения весового коэффициента α :

- 1 Определение весового коэффициента α графическим методом.
- 2 Определение оптимального значения весового коэффициента α в зависимости от уровня воздействия на ОУ: изменения дальности до сопровождаемого объекта, а также угла визирования ЛА.
- 3 Выбор весового коэффициента α эмпирическим методом, исходя из априорных сведений о допустимых перегрузках ОУ.
- 4 Выбор среднего значения весового коэффициента α на всем интервале наведения ОУ на ЛА.

Суть графического метода состоит в том, что необходимо построить функции

$$y_1(D, \alpha) = (D(t)/D_0)^{\frac{\kappa-1}{2}},$$

$$y_2(D, \alpha) = 4\dot{J}_u(t)D(t) / \left[(\sqrt{1+4\alpha/(1-\alpha)} + 3)(\sqrt{1+4\alpha/(1-\alpha)} - 1)\omega_0 \dot{D}^2 \right]$$

при фиксированной дальности D_i . Точка пересечения этих зависимостей и будет решением уравнения $y_1(D, \alpha) = y_2(D, \alpha)$ относительно коэффициента α_i для дальности D_i .

Для решения данной задачи использовали численный (половинный) метод.

К основным достоинствам метода половинного деления можно отнести:

- 1 Адаптивность к параметрам полета ЛА и ОУ.
- 2 Не требует больших вычислительных ресурсов.

Недостаток: требуется оценка производной от поперечного ускорения ЛА, что на данный момент является трудно реализуемой задачей.

Для оптимизации изменения коэффициента α в зависимости от значений D и θ_u , необходимо продифференцировать выражение (4) по коэффициенту α и приравнять полученное выражение к нулю. В результате получено следующее выражение:

$$\alpha(\theta_u, D) = \left[(F + E - 1)^2 - 1 \right] / \left[(F + E - 1)^2 + 3 \right], \quad (7)$$

где $F = (D/\dot{D}) \ln(D/D_0) / (6\dot{D} \ln(D(t)/D_0))$, $E = \sqrt{|B|} / (6\dot{D} \ln(D(t)/D_0))$,

$$B = D(t) \ln(D/D_0) \left[((ID)/\dot{D}^2) \cdot \ln(D/D_0) - 12 \right],$$

$$l = J_y \sin(\theta_y - \varphi) - J_p \sin(\theta_p - \varphi).$$

Достоинства метода:

- 1 Адаптивность к параметрам полета ЛА и ОУ.
- 2 При увеличении значения поперечного ускорения ЛА зависимость стремится к линейно – возрастающей, что в свою очередь приводит к равномерному распределению поперечных ускорений на всем протяжении полета ОУ.

Недостатки:

- 1 Требует больших вычислительных ресурсов.

- 2 Для расчета требуется знание оценок $\hat{D}$, $\hat{D}_0$, $\hat{V}_{сб}$, $\hat{\theta}_y$, $\hat{\theta}_p$, $\hat{\varphi}$, $\hat{J}_y$, $\hat{J}_p$.

Оценки $\hat{V}_{сб}$, $\hat{\theta}_y$, $\hat{\theta}_p$ и $\hat{J}_y$ можно получить в бортовой радиолокационной станции (БРЛС), обрабатывая сигналы, отражённые от перехватываемого ЛА. Оценка $\hat{J}_p$ собственных поперечных ускорений достаточно просто формируются по результатам измерения акселерометрами, сориентированными по собственным осям. Роль D_0 играет дальность целеуказаний, поступающая в ОУ из БРЛС.

Исходя анализа кривых, а также простоты реализации оптимальный закон изменения коэффициента α можно аппроксимировать в виде функции:

$$\alpha(D_i) = \lambda_D (D/D_0)^{m_D}, \quad (8)$$

где λ_D - постоянный коэффициент, определяющий максимальное значение коэффициента, D_i - значение дальности между ОУ и ЛА в i -тый момент времени. Из анализа выражения (8) видно, что в зависимости от значения степени m_D изменяется и характер поведения зависимости $\alpha(D_i)$. Недостатком закона изменения $\alpha(D_i)$ (8) является его приближенный характер.

Среднее значение коэффициента α выбиралось исходя из обеспечения среднего значения перегрузок на всем протяжении управляемого полета ОУ, но не превосходящего допустимого значения.

Таким образом, в процессе интенсивного маневра ЛА при наведении ОУ целесообразно использовать первый вариант, когда коэффициента α изменяется по оптимизированному закону (7) вследствие его адаптивности как к изменению дальности между ОУ и ЛА, так и к углу визирования ЛА.

Проверка эффективности синтезированного алгоритма траекторного управления и сравнение его с ранее известными методами, такими как метод

пропорционального наведения, параллельного сближения и погони, осуществлялась с помощью имитационного моделирования, которое было направлено на выявление особенностей функционирования полученного алгоритма в различных ситуациях. Показано, что при изменении скорости V_u и высоты H_u ЛА в широком диапазоне, предложенный алгоритм (6) обеспечивает сравнительно небольшую кривизну кинематической траектории на всех участках полета, при этом требуемые поперечные ускорения будут в среднем меньше на 10...15% по сравнению с ранее известными методами наведения.

Во второй главе рассмотрена процедура оптимизации синтезированного алгоритма траекторного управления ОУ, на основе теоретико – игрового подхода, которая включает следующие этапы:

1 Синтез на основе теории дифференциальных игр оптимальных стратегий поведения ОУ и ЛА, обеспечивающих минимальный конечный промах с учетом энергетических затрат на управление.

2 Анализ полученных решений (оптимальных управлений) дифференциальной игры поведения двух игроков ОУ и ЛА.

3 Проверка выполнения условий – минимума промаха по управлению J_p^0 и максимума промаха по управлению J_u^0 .

4 Осуществление имитационного моделирования полученных результатов.

В процессе решения рассматриваемой задачи ОУ строит свою стратегию поведения на основе априорной информации об ЛА.

Дифференциальную игру, то есть динамическую игру, динамика которой описывается дифференциальным уравнением, можно считать решенной, если для нее получен результат синтеза равновесных стратегий участников, то есть зависимость управляющих переменных от фазовых координат и времени. Из теории оптимального управления известно, что в игре с управлением полета преследователя основной характеристикой является его трансверсальное ускорение $J_p(t)$, нормальное к направлению линии визирования на преследуемый ЛА. Управлением преследуемого ЛА также является его трансверсальное ускорение $J_u(t)$, нормальное к направлению ЛВ. Задачу будем решать при условии, что ОУ является самонаводящимся. Как было отмечено ранее, преследователь стремится минимизировать конечный промах $|h(t_k)|$, тогда как преследуемый хочет его максимизировать. Таким образом, за критерий качества с учетом энергетических затрат на управление можно взять:

$$I = \frac{1}{2} [h(t_k)]^2 + \rho \int_0^{t_k} [\alpha \omega^2 \dot{D}^2 + (1 - \alpha) \dot{\omega}^2 D^2] dt, \quad (9)$$

где ρ – это положительное число, размерностью $[c^2]$.

Представим задачу синтеза оптимальных управлений ОУ и ЛА, применительно к теории дифференциальных игр, следующим образом.

Дана динамическая система, характеризующая перемещение ОУ и ЛА в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \dot{V}_{омн} = J_u \cos(\theta_u - \varphi) - J_p \cos(\theta_p - \varphi) - \dot{D}\omega, \\ \dot{h}_{омн} = V_{омн} = V_u \sin(\theta_u - \varphi) - V_p \sin(\theta_p - \varphi) + \dot{D}\varphi. \end{cases} \quad (10)$$

Синтез будет выполняться при условии, что будут выполняться следующие допущения:

- ОУ и ЛА рассматриваются как материальные точки с единичными массами.
- Все фазовые координаты измеряются идеально.

Требуется определить такие оптимальные стратегии управления ОУ и ЛА, чтобы выполнялись следующие неравенства:

$$I(J_p^0(t), J_u(t)) \leq I(J_p^0(t), J_u^0(t)) \leq I(J_p(t), J_u^0(t)), \quad (11)$$

где $J_p^0(t)$, $J_u^0(t)$ – оптимальные стратегии (управления) ОУ и ЛА, обеспечивающие седловое решение дифференциальной игры.

Решение двухточечной краевой задачи определения оптимальных поведений ОУ и ЛА начинается с построения вспомогательной функции (гамильтониана), которая объединяет критерий качества (9) с ограничениями (10) используя систему неопределенных множителей $\lambda_\omega, \lambda_\varphi$:

$$H = \lambda_\omega (\dot{V}_{омн} - \dot{D}\omega) + \lambda_\varphi (\dot{h}_{омн} + \dot{D}\varphi) + \rho [\alpha \omega^2 \dot{D}^2 + (1 - \alpha) \dot{\omega}^2 D^2]. \quad (12)$$

Для определения $\lambda_\omega, \lambda_\varphi$ составим сопряженную систему уравнений:

$$\begin{cases} \dot{\lambda}_\varphi = -\partial H / \partial (D\varphi), \\ \dot{\lambda}_\omega = -\partial H / \partial (D\omega). \end{cases} \quad (13)$$

Из курса теории оптимального управления известно, что необходимыми условиями для существования управлений $J_p^0(t)$, $J_u^0(t)$ являются:

$$\begin{aligned} dH/dJ_p &= 0, & dH/dJ_u &= 0, \\ \partial^2 H / \partial J_p^2 &\geq 0, & \partial^2 H / \partial J_u^2 &\leq 0. \end{aligned}$$

В результате синтеза получены выражения оптимальных стратегий поведения ОУ и ЛА:

$$J_p^0 \sin(\theta_p - \varphi) = \left(\dot{\theta}_p \dot{\theta}_u / (\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_u) \right) (\dot{D}\varphi - Z_{41}) - \left(\dot{\theta}_p \dot{Z}_{11} / (A_1 (\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_u)) \right), \quad (14)$$

$$J_u^0 \sin(\theta_u - \varphi) = \left(\dot{\theta}_p \dot{\theta}_u / ((\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_u)) \right) (\dot{D}\varphi - Z_{41}) - \left(\dot{\theta}_u \dot{Z}_{11} / A_1 (\dot{\theta}_p - \dot{\theta}_u) \right), \quad (15)$$

где $Z_{41} = \frac{D A_1 \dot{\theta}_u \sin^2(\theta_p - \varphi) \sin(2(\theta_u - \varphi)) - \dot{\theta}_p \sin^2(\theta_u - \varphi) \sin(2(\theta_p - \varphi))}{2 \dot{\theta}_p^2 \sin^2(\theta_u - \varphi) X_1 Z_{21} - \dot{\theta}_u^2 \sin^2(\theta_p - \varphi) X_2 Z_{31}},$

$$Z_{11} = \frac{DA_1}{2} \frac{\sin(2(\theta_p - \varphi)) \dot{\theta}_y^2 \dot{\theta}_p X_2 Z_{31} - \sin(2(\theta_y - \varphi)) \dot{\theta}_p^2 \dot{\theta}_y X_1 Z_{21}}{\dot{\theta}_p^2 \sin^2(\theta_y - \varphi) X_1 Z_{21} - \dot{\theta}_y^2 \sin^2(\theta_p - \varphi) X_2 Z_{31}},$$

$$Z_{31} = -\int_t^{t_k} A_1 \cdot \sin(\theta_y - \varphi) dt, Z_{21} = -\int_t^{t_k} A_1 \cdot \sin(\theta_p - \varphi) dt,$$

$$Z_{11} = -\int_t^{t_k} A_1 (J_{p1}^0 \sin(\theta_p - \varphi) - J_{y1}^0 \sin(\theta_y - \varphi)) dt, X_1 = \sin(\theta_p - \varphi) / \dot{\theta}_p,$$

$$X_2 = \sin(\theta_y - \varphi) / \dot{\theta}_y, Y_1 = \cos(\theta_p - \varphi), A_1 = 1 + 2\rho\alpha \int_t^{t_k} (\omega \dot{D}^2) / D^2 dt,$$

где ρ – характеризует квадрат обобщенного времени и приводит размерность подынтегрального выражения (1) к общей размерности гамильтониана системы $[M^2/c^2]$.

Для того чтобы выполнялся минимум промаха $h(t_k)$ по управлению $J_p^0(t)$, необходимо выполнение следующих условий:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_p \geq 0, (\theta_p - \varphi) \in]\pi; 2\pi[, \\ A_1 \geq 0, \\ \dot{\theta}_p \leq 0, (\theta_p - \varphi) \in]\pi; 2\pi[, \\ A_1 \leq 0. \end{cases} \quad (16)$$

На рисунке 1 изображено взаимное перемещение ОУ и ЛА, при котором со стороны ОУ будут выполняться условия (16).

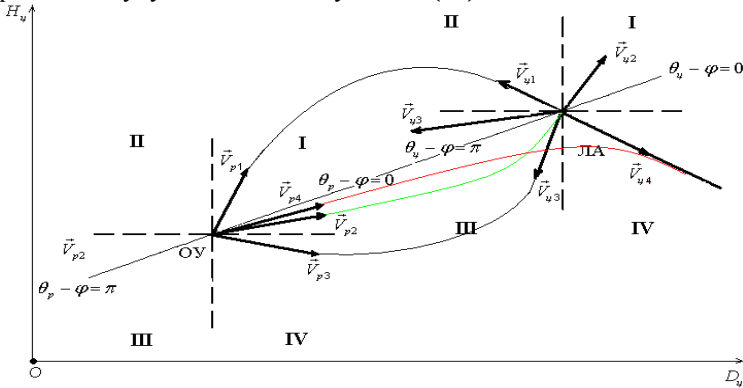


Рисунок 1

Вид полученных траекторий позволяет сделать ряд рекомендаций поведения ОУ:

1 Если ЛА совершает маневр в секторах I, IV то ОУ, для обеспечения минимума затрачиваемых поперечных ускорений на управление,

целесообразней выбрать следующие стратегии поведения: I сектор – $\dot{\theta}_p > 0$ и $\omega > 0$; IV – $\dot{\theta}_p < 0$ и $\omega < 0$. В данных случаях ОУ совершает наведение по траектории, близкой к кривой погони, но на конечном участке наведения траектория ОУ будет близка к прямолинейной (ОУ стремиться точно зайти ЛА в хвост).

2 При полете ЛА и ОУ на встречных курсах в секторах II, III, для обеспечения минимума затрачиваемой энергии на управление, ОУ целесообразней выбрать такую стратегию поведения, при которой в каждый момент времени собственная скорость изменения угла визирования $\dot{\theta}_p$ должна быть одного знака со значением A_1 , при этом, как и в первом случае, по мере сближения ОУ с ЛА угловая скорость вращения ЛВ $\omega(t)$ стремится к нулю.

Далее рассмотрены оптимальные варианты ухода ЛА от преследования ОУ. Получены условия, при которых выполняется максимум промаха $h(t_k)$ по управлению $J_u^0(t)$:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_u \geq 0, (\theta_u - \varphi) \in]\pi; 2\pi[, \\ A_1 \leq 0, \\ \dot{\theta}_u \leq 0, (\theta_u - \varphi) \in]\pi; 2\pi[, \\ A_1 \geq 0. \end{cases} \quad (17)$$

На рисунке 2 представлено противостояние двух игроков, при котором со стороны ЛА выполняются условия (17).

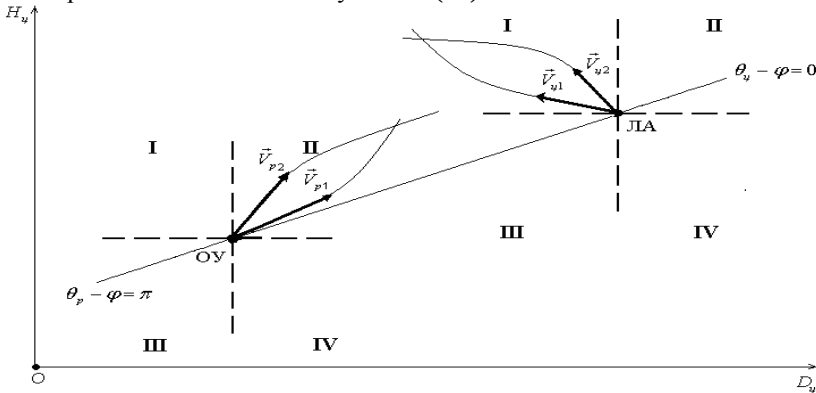


Рисунок 2

Анализ позволяет сделать следующие рекомендации поведения ЛА, позволяющие уйти от преследования ОУ при условии обеспечения минимума затрачиваемой энергии на управление: в процессе полета ЛА целесообразней анализировать характер поведения ОУ и выбирать противоположную

стратегию поведения, то есть: если ОУ совершает наведение по траектории $\vec{V}_{p1}$, то ЛА требуется уходить по направлению $\vec{V}_{u1}$ и наоборот.

Проведено имитационное моделирование, которое было направлено на проверку адекватности полученных решений, а также анализа выигрыша при управлении объектом синтезированным алгоритмом с учетом полученных условий (16). Выявлено, что требуемые поперечные ускорения в зависимости от выполняемого маневра будут меньше: на (37..43)% для маневра ЛА «змейка»; на (30...50)% при маневре «кобра Пугачева»; на (30...52)% при «пикировании под зону поражения ОУ», и на (40...44)% для маневра «колокол».

В третьей главе рассмотрены практические аспекты применения полученного алгоритма (6) с учетом условий (16), разработанных во второй главе. Сформулирована методика выбора способа определения весового коэффициента α для предложенного алгоритма в зависимости от интенсивности маневра, а также скорости полета ЛА, позволяющая уменьшить требуемые поперечные ускорения на 10...15%, а также время полета на 5...8% в процессе наведения на маневрирующий ЛА. На рисунке 3 представлена блок – схема выбора способа определения весового коэффициента для предложенного алгоритма наведения (6)

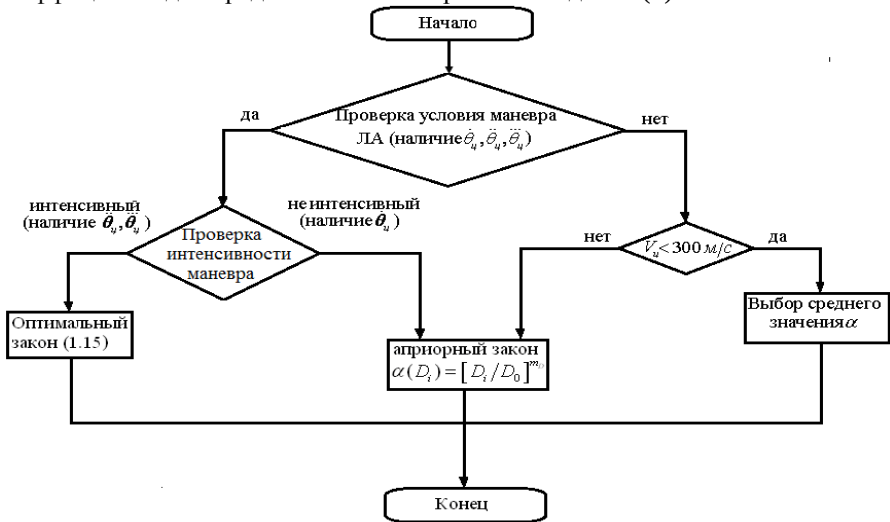


Рисунок 3

Рассмотрено влияние ошибок формирования оценок измерителей на требуемую траекторию наведения. На рисунке 4 представлены зависимости ошибок отдельных измерителей от расстояния между ОУ и ЛА.

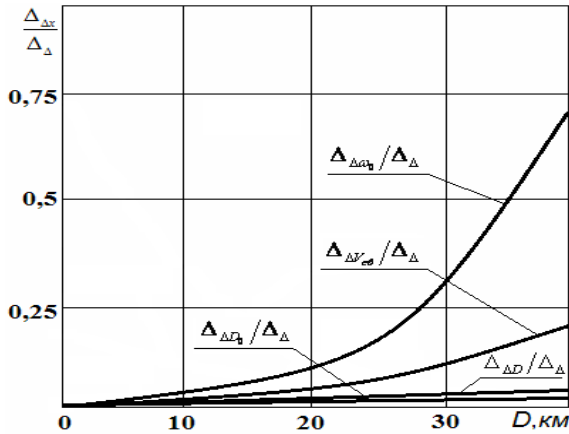


Рисунок 4

Показано, что дальноммерный канал ИВС незначительно влияет на общую ошибку формирования требуемой траектории полета ОУ. На начальном участке наведения основной вклад в общую ошибку формирования требуемой траектории вносит угломерный канал, формирующий оценку $\hat{\omega}_0$.

Как было показано в первой главе, можно использовать три способа изменения коэффициента α . Графический способ в практической реализации может быть не использован, так как требуется оценка производной от поперечного ускорения ЛА, что на данный момент является трудно реализуемой задачей. Выбор может осуществляться исходя из интенсивности, а также скорости полета ЛА.

В процессе имитационного моделирования показано, что не зависимо от вида маневра ЛА выигрыш в уменьшении требуемых значений поперечных ускорений при оптимальном определении составляет 20...30% по сравнению с другими способами определения коэффициента α . Если ЛА совершает не интенсивный маневр, то целесообразней выбирать эмпирический способ определения, так как разница в диапазоне изменения поперечных ускорений по сравнению с оптимальным составляет 5...10%, однако эмпирический метод выигрывает в простоте реализации (требует знания только двух оценок). При отсутствии маневра ЛА диапазон изменения требуемых поперечных ускорений для трех способов практически одинаковый, следовательно, для уменьшения вычислительных затрат целесообразней в процессе полета выбрать среднее значение весового коэффициента α .

Как показали исследования, из требований по быстродействию, возможности оптимизации энергопотребления, привлекательной цены, в устройстве вычисления требуемого значения $J_{pm}(t)$ при наведении синтезированным алгоритмом (6) целесообразно использовать микроконтроллер AVR фирмы Atmel.

Сформулированы основные требования к интерфейсу устройства на основе синтезированного алгоритма траекторного управления при самонаведении ОУ. Разработана программная реализация синтезированного алгоритма, позволяющая вычисление требуемого значения поперечного ускорения ОУ на языке «С++».

В заключении приведены основные научные и практические результаты диссертационной работы:

1 На основе комбинированного критерия качества осуществлен синтез алгоритма управления объектом при наведении на маневрирующий ЛА.

2 Выявлено, что в ходе воздушного противоборства, при котором ЛА совершает такие маневры, как «кобра», «змейка», «пикирование под зону поражения ОУ», для полученного алгоритма требуемые значения поперечных ускорений, так же как и для метода параллельного сближения, соизмеримы с поперечными ускорениями ЛА и составляют $J_{pt \max} = 50...75 \text{ м/с}^2$. Однако полученный алгоритм обладает лучшими показателями эффективности по сравнению с МПН и методом погони, при этом ОУ в процессе полета требуются на 60% меньшие значения боковых ускорений.

3 Показано, что если ЛА совершает маневр «колокол», то все существующие методы наведения ОУ существенно ухудшают свои характеристики. Максимальные значения требуемых ускорений, в момент перехода к снижению высоты, скачком увеличиваются и составляют следующие значения: для МПН $J_{pt \max} \rightarrow \infty$; метод параллельного сближения $J_{pt \max} = 180 \text{ м/с}^2$; метод погони $J_{pt \max} \rightarrow \infty$; полученным алгоритмом $J_{pt \max} = 160 \text{ м/с}^2$, что на 12% меньше чем для метода параллельного сближения.

4 Обоснован состав ИВС, которая по сравнению с ранее известными включает новые:

- Модуль обработки информации.
- Устройство формирования коэффициента α .

5 Проанализированы способы определения весового коэффициента α для полученного алгоритма наведения ОУ, позволяющие повысить точность, уменьшить время наведения, а также требуемые перегрузки ОУ по сравнению с ранее известными методами самонаведения.

6 Проведена оценка степени влияния возможных ошибок измерителей на точность наведения ОУ, если в процессе управления используется синтезированный алгоритм (6). Показано, что относительный вклад отдельных измерителей в общую ошибку формирования параметра рассогласования составляет: $\Delta_{\Delta V_{сб}} / \Delta_{\Delta} - 10...15\%$; $\Delta_{\Delta D} / \Delta_{\Delta} - 4...5\%$; $\Delta_{\Delta D_0} / \Delta_{\Delta} - 4...5\%$; $\Delta_{\Delta a_0} / \Delta_{\Delta} - 70...75\%$.

7 Показано, что если учитывать реальные переменные значения скоростей ОУ и ЛА, то не зависимо от способа маневра ЛА, скорости сближения, синтезированный алгоритм (6) требует меньше времени наведения ОУ. При этом значение времени наведения t_n для переменных скоростей ОУ и ЛА V_p, V_u увеличивается, по сравнению с постоянными на 19,22%; 18,17; 21,86% для метода параллельного сближения, 18,4%; 18,7%; 23,22% для МПН, 17,68%; 17,4%; 19,84% при выборе синтезированного алгоритма, 25,9%; 17,8%; 30,5% для метода «погоня» в процессе маневра «кобра Пугачева», «пикирование под зону поражения ОУ» и «колокол» соответственно.

8 На основе теоретико – игрового подхода осуществлена процедура оптимизации синтезированного алгоритма наведения ОУ. Показано, что в широком диапазоне изменения V_u и H_u , предложенный алгоритм (6) с учетом полученных условий (11) обеспечивает большую эффективность, при этом:

- Требуемые поперечные ускорения в зависимости от выполняемого маневра будут меньше: на (37..43)% для маневра ЛА «змейка»; на (30...50)% при маневре «кобра Пугачева»; на (30...52)% при «пикировании под зону поражения ОУ», и на (40...44)% для маневра «колокол».

- Не зависимо от скорости V_u , высоты полета H_u , совершаемого маневра ЛА, траектория полета ОУ стремится к прямолинейной по сравнению с унифицированным методом, при этом диапазон изменения требуемых поперечных ускорений ΔJ_{pm} уменьшается: на (36..43)% для маневра ЛА «змейка»; на (44...64)% при маневре «кобра Пугачева»; на (40...46)% при «пикировании под зону поражения ОУ», и на (31...40)% для маневра «колокол».

9 Обоснована методика выбора способа определения весового коэффициента α в зависимости от интенсивности маневра, а также скорости полета ЛА, с последующим вычислением его численного значения.

10 Сделан анализ современных средств, который показал, что для реализации предложенных алгоритмов целесообразно использовать AVR-микроконтроллеры семейства AT91SAM так как:

- При той же тактовой частоте AVR – микроконтроллеры обладают в 4 раза большей производительностью, что позволяет за более короткое время определить требуемое значение $J_{pm}(t)$ при наведении синтезированным алгоритмом (6).

- При той же производительности потребляемая AVR – микроконтроллерами мощность также оказывается меньшей в 3...4 раза, чем у PIC.

Список публикаций

1 Токарь А.Д. Анализ алгоритмов автоматического сопровождения воздушных объектов // Материалы 14-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Тезисы докладов. Рязань 2005. С.73 – 74.

2 Токарь А.Д. Сравнительный анализ динамических ошибок метода пропорционального наведения и модифицированного алгоритма наведения ракет на воздушные цели // Вестник РГРТА. Рязань 2007. Вып.20. С.44 – 47.

3 Токарь А.Д. Анализ функционалов качества, применяемых при синтезировании оптимальных алгоритмов самонаводящихся объектов // Материалы XII Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Тезисы докладов. Рязань 2007. С.137 – 138.

4 С.Н. Кириллов, А.Д. Токарь. Эффективный алгоритм наведения объекта управления на маневрирующие воздушные цели // Вестник РГРТА. Рязань 2008. Вып.24. С.33-36.

5 Токарь А.Д. Оптимальный алгоритм наведения ракеты, адаптивный к импульсным входным воздействиям // Материалы 32-й Всероссийской научно-практической конференции «Сети, системы связи и телекоммуникации». Тезисы докладов. Рязань 2008. С.174.

6 Токарь А.Д. Оптимальный алгоритм наведения, обеспечивающий минимум энергетических затрат ракеты при маневре летательного аппарата // Материалы 15-й международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций». Тезисы докладов. Рязань 2008. С.66 – 67.

7 Токарь А.Д. Определение весовых коэффициентов для эффективного алгоритма наведения объекта управления // Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании». Тезисы докладов. Рязань 2008. С.133 – 135.

8 С.Н. Кириллов, А.Д. Токарь. Алгоритм автономного траекторного управления летательным аппаратом, устойчивый к мешающим факторам // Вестник РГРТА. Рязань 2009. Вып.29. С.23 – 27.

9 Токарь А.Д. Модернизация существующих методов самонаводящихся объектов // Материалы 33-й Всероссийской научно-технической конференции «Сети, системы связи и телекоммуникации». Тезисы докладов. Рязань 2009. С.17 – 18.

10 Токарь А.Д. Повышение устойчивости траектории полета объекта управления при воздействии быстроизменяющихся возмущений // Материалы 34-й Всероссийской научно-технической конференции «Информационные и телекоммуникационные технологии». Тезисы докладов. Рязань 2009. С.347 – 348.

11 С.Н. Кириллов, А.Д. Токарь. Теоретико – игровой подход в определении оптимальных стратегий поведения двух противоборствующих воздушных объектов // Вестник РГРТУ. Рязань 2010. Вып.32. С.32 – 38.

Токарь Аркадий Дмитриевич

Оптимальные по комбинированному критерию качества алгоритмы
управления объектом при маневре летательного аппарата

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать. Формат бумаги 60×80 1/16.

Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно – издательский центр РГРТУ.