



УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИПУ РАН,
чл.-корр. РАН Новиков Д. А.

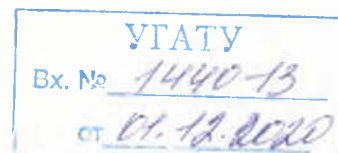
«20» 11 2020 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Муслимова Тагира Забировича «Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа» по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы) на соискание ученой степени кандидата технических наук

Актуальность темы исследования

Диссертационное исследование Муслимова Тагира Забировича посвящено проблеме децентрализованного управления группами автономных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) самолетного типа. Наблюдаемый в последние годы рост числа научных публикаций по данной теме обусловлен как развитием технологий, так и широким классом практических задач, решение которых возможно только при использовании групп взаимодействующих БПЛА. При этом БПЛА самолетного типа как объект управления обладает рядом особенностей, которые необходимо учесть при разработке методов и алгоритмов управления формациями таких летательных аппаратов. Следует отметить, что при решении задач управления движением групп БПЛА децентрализация управления дает ряд несомненных преимуществ, однако теоретический анализ децентрализованных систем, в которых каждый агент-БПЛА самостоятельно принимает решения о своем поведении, представляет наукоемкую задачу, при решении которой должны быть учтены факторы различной природы, физические, математические, инженерные. Таким образом, разработка



децентрализованного управления группами БПЛА, применимого в реальных условиях, учитывающего особенности динамики объектов и спроектированную с единую систему «автопилот–БПЛА», является актуальной. В диссертационной работе Муслимова Т.З. рассматривается такое управление для сценария согласованного следования пути (задача путевой стабилизации), когда каждый из БПЛА не только выходит на заданный путь, но и одновременно выполняет задачу формирования-управления строем (формацией). Анализ возможности автономного децентрализованного управления формацией БПЛА в такой постановке представляет как теоретический, так и практический интерес, поскольку данный сценарий является базовым для многих стандартных полетных миссий БПЛА самолетного типа.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертация Муслимова Т.З. состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, содержания и приложения. Работа изложена на 164 страницах, содержит 52 иллюстрации, 9 таблиц. Библиография включает 187 наименований. Диссертация имеет ясную структуру, изложена логически последовательно и соответствует поставленным целям и задачам исследования. Содержание автореферата в полной мере отражает результаты диссертационной работы.

Во *введении* автором показана актуальность темы исследования, указываются цель и основные задачи исследования, определены объект и предмет исследования, описаны применяемые методы, приведены основные результаты исследования, а также указаны их научная новизна, теоретическая и практическая значимости.

В *первой главе* проводится анализ основных существующих подходов к групповому управлению автономными мобильными роботами, в том числе автономными БПЛА. Приведены как недостатки, так и преимущества этих

подходов, при этом обосновано преимущество децентрализованного группового управления. Подробно описывается в качестве примеров несколько миссий для автономных БПЛА самолетного типа, необходимым условием выполнения которых является управление строем. В конце первой главы приводится формальная постановка задач данного исследования, заключающаяся в стратегии согласованной путевой стабилизации для децентрализованной группы БПЛА самолетного типа. Следует отметить, что в приведенных примерах задание формы строя БПЛА рассматривается в проекции на горизонтальную плоскость.

Вторая глава диссертации посвящена параллельным формациям БПЛА, осуществляющим ориентирование вдоль прямолинейного пути. Описана архитектура взаимодействия по схеме консенсуса, основанная на модификации известного подхода к управлению формациями линейных агентов на плоскости. Для двух сценариев (ориентирование по общему курсовому углу и ориентирование относительно пути в виде прямой линии) предложены децентрализованные законы управления для скоростей и курсовых углов БПЛА в группе, обеспечивающие асимптотическую устойчивость в целом системы строя БПЛА. Данные законы управления задают для каждого БПЛА векторное поле в виде отображения ставящего в соответствие каждой точке плоскости, в которой задается форма строя, определенный вектор, норма которого является командой скорости, а направление – курсовым углом. Особенностью предлагаемых законов управления является учет ограничений на входные сигналы управления в реальных автопилотах БПЛА. Таким образом, автору удалось развить известный метод векторных полей Ляпунова, ранее разработанный для одиночных летательных аппаратов, и который, соответственно, рассматривал однородные по величине векторные поля в предположении постоянной скорости полета. Далее, с помощью метода нелинейного синтеза «бэкстеппинг» (также известного как метод обхода интегратора) автором

осуществлен переход от кинематических к динамическим высокоуровневым моделям систем «автопилот–БПЛА» и получены алгоритмы формирования управляющих воздействий для БПЛА. За счет этого гарантирована сходимости траекторий полета к заданному векторному полю, и рассмотрена возможность применения методов адаптивного управления. Автором предложен алгоритм интегральной адаптивной самонастройки для системы строя БПЛА, позволяющий компенсировать наличие параметрических неопределенностей в реальных условиях полета.

В *третьей главе* исследуются круговые децентрализованные формации БПЛА, которые могут применяться на практике в сценарии отслеживания группой БПЛА наземной цели. Предложены децентрализованные законы управления для скоростей и курсовых углов БПЛА в группе, обеспечивающие асимптотическую устойчивость в целом системы кругового строя БПЛА. Аналогично второй главе в данном случае предложено неоднородное как по величине, так и по направлению векторное поле Ляпунова, обеспечивающее выполнение задачи согласованного следования круговому пути. Алгоритмы формирования управляющих воздействий получены посредством нелинейного синтеза, как и во второй главе. Также предложен алгоритм адаптивной интегральной самонастройки для случая круговых формаций БПЛА и рассмотрен вариант адаптивной настройки по эталонной модели с использованием нечетких функций Ляпунова.

В *четвертой главе* проводится численное экспериментальное исследование предложенных методов и алгоритмов посредством имитационного компьютерного моделирования на полных нелинейных моделях БПЛА в среде MATLAB/Simulink. Описывается модель динамики полета БПЛА самолетного типа с 6 степенями свободы и 12 состояниями. Далее автор проводит синтез стандартного автопилота методом последовательного замыкания контура (англ. successive loop closure) для трехмерного движения БПЛА. Приводятся результаты численных

экспериментов как для параллельных, так и круговых формаций БПЛА, показывающие выполнение целей управления и успешную работу предложенных автором алгоритмов параметрической адаптации. В реализованных сравнительных экспериментах продемонстрированы преимущества предложенных автором методов и алгоритмов по сравнению с уже известными из ранее опубликованных работ по данной тематике.

В *заключении* сказано, что решена актуальная задача децентрализованного управления формированием и поддержанием строя БПЛА самолетного типа произвольной геометрической формы с учетом нелинейной динамики и ее неопределенности в реальных системах «автопилот-БПЛА», перечислены основные результаты диссертационной работы и предложены направления дальнейших исследований.

Научная новизна полученных результатов

Научная новизна диссертационной работы Муслимова Т. З. заключается в разработке методов группового управления на основе неоднородных как по величине, так и по направлению векторных полей следования пути, обеспечивающих одновременное выполнение группой БПЛА задач путевой стабилизации и управления децентрализованной формацией. При этом проанализирована устойчивость системы строя БПЛА как единого целого, состоящего из подсистем путевой стабилизации и формирования строя. Синтез управляющих воздействия для системы строя проводился с учетом ограничений на входные сигналы управления, что, в отличие от известных алгоритмов управления для линейных агентов, позволяет избежать эффекта интегрального насыщения в реальных системах «автопилот-БПЛА». Автором предложены алгоритмы адаптивной самонастройки параметров, позволяющие, в отличие от неадаптивных управляющих воздействий для кинематических моделей, сохранить устойчивость строя и качество переходных траекторий БПЛА в случае

заранее неизвестных или изменившихся в полете параметров формации БПЛА. По сравнению с публикациями, использующими для моделирования БПЛА упрощенные модели низкого порядка, автором получены результаты численного моделирования разработанных методов и алгоритмов на полных нелинейных моделях с 6 степенями свободы и 12 состояниями.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность полученных в диссертационной работе Муслимова Т. З. результатов подтверждается использованием общепризнанных методов линейной алгебры, теории группового управления, метода функций Ляпунова, методов теории нечеткой логики, теории нелинейного управления, теории адаптивного управления. Теоретические выводы проверены имитационным моделированием на полных нелинейных моделях БПЛА.

Главные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях. Основные результаты проведенных автором исследований опубликованы в 4 статьях в журналах из списка ВАК; в 1 статье в журнале, входящем в базу *Science Citation Index Expanded* (Q1); в 5 статьях в изданиях, индексируемых базой *Scopus*.

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных автором диссертации

Теоретическая значимость диссертационной работы Муслимова Т. З. заключается в развитии методов и алгоритмов группового управления автономными БПЛА. Автором предложено децентрализованное адаптивное управление формированием и поддержанием строя БПЛА самолетного типа с учетом особенностей динамики реальных систем «автопилот-БПЛА».

Практическая значимость результатов работы содержится в возможности использования полученных результатов при создании систем

группового управления автономными БПЛА самолетного типа, предназначенных для выполнения ряда важных задач в реальных условиях полета. Подтверждением практической ценности работы служат акты внедрения, приведенные в Приложении А диссертации.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Научные результаты диссертационного исследования Муслимова Т. З. могут использоваться в создании систем группового управления БПЛА самолетного типа, необходимых для решения таких практических задач как согласованное отслеживание наземных целей, радиоэлектронное подавление, преодоление противовоздушной обороны (ПВО) противника с помощью ложных целей, измерение профилей ветра для метеорологических исследований, автоматическая дозаправка в воздухе, увеличение полезной нагрузки или дальности за счет снижения индуктивного сопротивления в случае полета плотным строем и др.

Замечания по диссертационной работе

К тексту диссертационной работы имеется некоторое количество замечаний.

1. На стр. 51 для описание взаимодействия между БПЛА вводятся матрицы M_i . Однако опущена связь этих матриц со структурными матрицами A и B . Далее не указано для какой модели и при каких параметрах проводилось моделирование для рис. 2.3. Складывается впечатление, что моделирование проведено вблизи положения равновесия.

2. На стр. 66 присутствуют матрицы K^{line} , K^τ , \mathcal{H} , однако отсутствует описание как они формируются. В этом месте в исследовании есть ссылка на работу автора, поэтому следовало привести явный вид этих матриц.

3. На стр. 68 нестандартным образом вводится вектор θ . Следовало его ввести отдельным выражением, а не скобкой в уравнении.

4. На стр. 84 используется выражение «ограниченная константа γ_1 ». Следовало писать «константа γ_1 », а также получить качественную оценку зависимости γ_1 от начального положения, радиуса траектории и других параметров модели.

5. В уравнения (2.26), (2.27) и др. входит положительно определенная матрица K^Z . В работе вопрос выбора такой матрицы не обсуждается, хотя конкретный ее вид существенно влияет на качество реализуемых траекторий БПЛА. Только в главе 4 таблице 4 на стр. 125 приведено, что матрица выбрана единичной.

Вышеуказанные замечания не снижают ценность диссертационной работы и не влияют на общее положительное впечатление от проведенного исследования.

Заключение

Диссертационная работа Муслимова Тагира Забировича «Методы и алгоритмы группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа» на соискание ученой степени кандидата технических наук является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему. В данной работе содержится решение задач децентрализованного адаптивного управления группами БПЛА самолетного типа, имеющих значение в области группового управления автономными подвижными объектами.

Основные результаты диссертационного исследования достаточно полно отражены в публикациях автора, а автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Муслимов Тагир Забирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по

специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

Диссертационная работа Муслимова Тагира Забировича и данный отзыв обсуждены на *расширенном семинаре лаб. 38 «Управление по неполным данным» ИПУ РАН 19.11.2020, протокол № 1*

Отзыв составлен:

доктор технических наук, профессор,
Рубинович Евгений Яковлевич


19.11.2020

главный научный сотрудник,
лаборатория №38 «Управление по неполным данным»,
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова
Российской академии наук

Докторская диссертация защищена
по специальности 05.13.01 – Системный анализ, управление и
обработка информации

Адрес организации: 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

Рабочий телефон: +7 (495) 334-89-10

Адрес эл. почты: dan@ipu.ru



Подпись *Рубиновича Е.Я.*
ЗАВЕРЯЮ
Зав. ОТДЕЛОМ КАДРОВ
Н.А. Габрилова