

ОТЗЫВ

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

Актуальность темы диссертации. Совершенствование современных систем управления техническими объектами, в том числе и подвижными автономными, предполагает и предопределяет управление группами таких объектов. Именно групповое применение сложных технических объектов, например, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) открывает новые горизонты их эффективного применения, а в целом ряде случаев и возможности принципиально новых применений. Совершенно особую роль начинают играть групповые действия автономных средств вооружения при организации военных действий. Важнейшим аспектом применения групп технических объектов является координированное и кооперативное управление всем комплексом объектов. В особенности это относится к проблемам управления автономными беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) самолетного типа из-за сложности управления, обусловленной высокой динамикой событий и ограничений на входные сигналы управления в реальных системах. Между тем, с прикладной точки зрения именно проблемы группового управления БПЛА самолетного типа, обладающих значительной автономностью наиболее важны и перспективны, поскольку их применение открывает большие перспективы в решении самых различных задач как военного, так и гражданского применения таких, как картографирование местности, совместное наведение на цель, воздушное информационно-разведывательное прикрытие наземных операций, радиоэлектронное подавление противника, патрулирование, наблюдение, разведка и т.п. При этом, основные исполнители этих сложных и объемных задач – БПЛА – обладают собственными динамическими свойствами\особенностями, которые следует учитывать при проектировании как локальных законов управления для них, так и законов группового управления.

Среди законов группового управления наибольший интерес вызывают законы и алгоритмы, реализующие децентрализованное управление группой\группами БПЛА, поскольку децентрализация управления обеспечивает возможность масштабирования, значительно повышает выживаемость группы, резко увеличивает вероятность успешного выполнения задач группы в условиях неопределенностей среды и противодействия.

Следует отметить, что задачи группового управления подвижными объектами (наземными, воздушными, космическими, водными\подводными) весьма интенсивно разрабатываются во многих странах различными научными группами и организациями, что подчеркивает важность и актуальность таких задач. Анализ публикаций в открытой печати показывает, что интенсивно ведутся работы по централизованному управлению группами объектов и в меньшей мере – по децентрализованному управлению группами объектов. При этом чаще всего рассматриваются упрощенные цели и структуры групп объектов с минимальными ограничениями как на сами объекты, так и на группы объектов. При этом задачам децентрализованного управления группами объектов уделяется заметно меньше внимание – видимо в силу их большей сложности, а если и рассматриваются задачи децентрализованного управления, то, как правило, эти задачи рассматриваются и решаются в упрощенном виде. Отсюда можно сделать вывод, что многие вопросы\задачи

УГАТУ
Вх. № 1523-12
от 09.12.2020

децентрализованного управления группами подвижных объектов остаются пока еще не решенными.

Таким образом, следует заключить, что рецензируемая диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи – разработке методов и алгоритмов децентрализованного группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа – очень остро стоящей перед разработчиками и пользователями подобных автономных подвижных объектов.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

В **первой главе**, на основе системного подхода проведен аналитический обзор различных свойств архитектур построения групп БПЛА, которые влияют на подходы к управлению группами БПЛА, в частности показано преимущество децентрализации управления. Здесь же обосновывается актуальность применения групп БПЛА на примере различных миссий, выполняемых группой БПЛА, проведен системный анализ реализуемости децентрализованного управления группой автономных объектов с точки зрения существования мобильных систем, позволяющих с достаточной точностью проводить как обмен навигационными данными, так и измерять относительные положения объектов в пространстве, проанализированы основные наиболее распространенные подходы к управлению формированием и поддержанием строя автономных роботов, в том числе БПЛА.

На основе проведенного анализа предложена и обоснована концепция кооперативного управления группой\строем БПЛА на полностью децентрализованных алгоритмах управления строем, позволяющих создавать структуры группы БПЛА, произвольные по относительным расстояниям между аппаратами, и при этом учитывающих нелинейный характер структуры реальных систем «автопилот-БПЛА». Убедительно показано, что эффективное решение задачи кооперативного управления группой БПЛА самолетного типа может быть достигнуто на основе создания полностью децентрализованных алгоритмов управления строем, позволяющих создавать группы\строи, с произвольными расстояниями между элементами группы, и учитывающих нелинейный характер структуры реальных систем.

Все это позволило автору работы в целом правильно сформулировать цель и задачи исследования, обосновать примененный математический аппарат.

Во **второй главе** диссертационной работы представлены результаты исследований алгоритмов управления группой\строем БПЛА самолетного типа, учитывающих особенности динамики реальных систем «автопилот-БПЛА»: предложена модель архитектуры децентрализованного взаимодействия БПЛА на основе консенсуса; разработаны законы управления, учитывающие ограничения на входные сигналы управления системы «автопилот-БПЛА» для случая формирования и поддержания строя по общему курсовому углу, здесь же доказана их асимптотическая устойчивость в целом; разработаны законы управления, учитывающие ограничения на входные сигналы управления системы «автопилот-БПЛА» для случая формирования и поддержания строя при ориентировании по общему заданному прямолинейному пути, приведены доказательства их асимптотической устойчивости в целом. На основе этих результатов аналитически синтезированы управляющие воздействия, обеспечивающие формирование и поддержание строя для скоростей и курсовых углов БПЛА, гарантирующие сходимость текущих курсовых

углов и скоростей к задаваемым в законах управления, для сценария полета БПЛА строем при ориентировании по прямолинейному пути. Разработан алгоритм параметрической адаптации системы «автопилот-БПЛА», позволяющий сохранить устойчивость и качество переходных траекторий БПЛА в случае, если динамика одного или нескольких аппаратов отличается от применявшейся при первоначальной настройке алгоритмов кооперативного управления.

Следует отметить, что все перечисленные результаты получены при строгой математической постановке задач и доказаны теоретически в виде целого ряда теорем.

В **третьей главе** диссертационной работы представлены результаты исследований алгоритмов управления круговым строем группы БПЛА самолетного типа, учитывающих особенности динамики реальных систем «автопилот-БПЛА»:

В этой части работы представлена и обоснована модель архитектуры децентрализованного взаимодействия БПЛА на основе консенсуса для круговых формаций, разработаны законы управления, учитывающие ограничения на входные сигналы управления системы «автопилот-БПЛА» для случая формирования и поддержания строя при выходе на общий круговой путь, доказана асимптотическая устойчивость в целом предлагаемых алгоритмов управления. При этом были рассмотрены два случая: с учетом допущения о строгом выдерживании всеми аппаратами заданного кругового пути и с устранением указанного допущения.

На основе предложенных законов управления для сценария полета БПЛА круговым строем синтезированы управляющие воздействия формированием и поддержанием строя для скоростей и курсовых углов БПЛА, гарантирующие сходимость текущих курсовых углов и скоростей к задаваемым в законах управления,

Разработан алгоритм параметрической адаптации систем «автопилот-БПЛА», позволяющий сохранить устойчивость и качество переходных траекторий БПЛА при формировании и поддержании круговой формации в случае, если динамика одного или нескольких аппаратов отличается от применявшейся при первоначальной настройке алгоритмов кооперативного управления.

Разработан алгоритм адаптивной самонастройки системы управления строем с использованием теории нечеткой логики на основе нечетких функций Ляпунова, позволяющий сохранить устойчивость и качество переходных траекторий БПЛА при формировании и поддержании строя в случае отличающейся динамики аппаратов.

Как и в предыдущей главе, все перечисленные результаты получены при строгой математической постановке задач и доказаны теоретически в виде целого ряда теорем.

В **четвертой главе** диссертационной работы представлены результаты вычислительных экспериментов на имитационных нелинейных моделях динамики БПЛА, оснащенных настроенными моделями стандартных автопилотов, направленные на экспериментальную проверку работоспособности и эффективности предложенных методов и алгоритмов управления строем БПЛА.

В рамках этой главы работы реализованы достаточно сложные и информативные имитационные модели БПЛА самолетного типа, синтезирована модель стандартного автопилота БПЛА самолетного типа «летающее крыло»

Проведенное имитационное моделирование полета для группы из четырех БПЛА с использованием разработанных в диссертации управляющих воздействий для случаев формирования и поддержания строя при ориентировании прямолинейного полета

относительно фиксированного пути в виде линии и при выходе на круговой путь показало полную работоспособность и эффективность разработанных в диссертации решений.

Сравнительные исследования эффективности различных алгоритмов управления, проведенные на имитационных моделях, показали высокую эффективность предложенных алгоритмов адаптивной самонастройки с сохранением устойчивости и качества переходных траекторий БПЛА при формировании и поддержании строя. Высокая эффективность показана для предложенного метода группового управления БПЛА и при сравнении с известными из литературы методом асимметричного потенциального поля для круговых формаций и методом неоднородного только по направлению векторного поля.

В целом, постановки задач на проведение экспериментов, приведенные в работе, и выбор исходных данных в целом корректны и обоснованы. Эффективность применения разработанных автором моделей и алгоритмов управления представлена достаточно наглядно и убедительно. При проведении исследования использовано современное программное обеспечение.

Заключение диссертационной работы отражает основные результаты исследования, полученные Муслимовым Т.З.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректными постановками задач, строго корректным использованием методов линейной алгебры, теории группового управления, метод функций Ляпунова, методы теории нечеткой логики, теории нелинейного управления, теории адаптивного управления, компьютерного моделирования, согласованностью приведенных в работе теоретических результатов и результатов вычислительного эксперимента, достаточно широкой апробацией результатов. Использование реальных данных при проведении вычислительного эксперимента подтверждает достоверность результатов, полученных с применением разработанных моделей и алгоритмов.

Приведенный анализ диссертационной работы позволяет заключить, что цель работы достигнута, а поставленные автором задачи исследования решены.

Основными научными результатами, обладающими признаками **научной новизны**, полученными лично автором, следует считать:

- Метод управления строем/формацией автономных БПЛА самолетного типа на основе децентрализованной архитектуры консенсуса и неоднородного векторного поля следования прямолинейному и круговому пути, обеспечивающий получение произвольной желаемой формы строя БПЛА.
- Методы управления строем БПЛА в различных сценариях (сбор группы согласно общему курсовому углу, сбор при ориентировании по прямолинейному пути и выход на круговой путь), гарантирующие асимптотическое стремление относительных положений и скоростей к заданным значениям.
- Алгоритмы формирования управляющих воздействий БПЛА, позволяющие гарантировать сходимости курсовых углов и скоростей к задаваемым посредством законов управления и применить адаптивную настройку неопределенных параметров системы.
- Алгоритмы адаптивной самонастройки коэффициентов в режиме реального времени по эталонной модели и интегральной параметрической самонастройки, позволяющие сохранить устойчивость системы строя и значительно улучшить качество переходных траекторий БПЛА.

Теоретическая значимость результатов диссертации заключается в развитии методов и алгоритмов группового управления автономными подвижными объектами при решении задач децентрализованного адаптивного управления формированием и поддержанием строя подвижных объектов с учетом особенностей динамики реальных систем.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что полученные научные результаты могут непосредственно использоваться при создании систем группового управления БПЛА самолетного типа, необходимых для решения таких практических задач как радиоэлектронное подавление, преодоление ПВО противника с помощью ложных целей, совместное наведение на цель, измерение профилей ветра для метеорологических исследований, автоматическая дозаправка в воздухе и др.

Содержание автореферата, в целом, соответствует идеям, тексту и выводам диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 печатных работах, из которых 4 – в рецензируемых научных изданиях из списка ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, 5 статей в научных журналах, индексируемых наукометрической базой Scopus, 1 статья в журнале, входящем в Science Citation Index Expanded. Результаты работы докладывались и обсуждались на 11 всероссийских и международных научных конференциях.

Личный вклад автора в публикациях, написанных в соавторстве, разграничен.

Тема и содержание диссертации соответствуют пунктам паспорта специальности 05.13.01: п.2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации 4; п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации»; п.7 «Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем»; п. 9 «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов».

На основе проведенного анализа содержания диссертационной работы следует сделать заключение о том, что задачи, которые ставил в работе автор диссертации, решены.

Оценивая работу в целом положительно, необходимо отметить следующие замечания и рекомендации:

1. В тексте диссертации автор применил подход, когда постановки задач осуществляются в краткой форме, но всегда при этом дается ссылка на собственную статью автора, где эта задача поставлена полно и подробно. Это же относится и к некоторым нотациям формул. Такой подход, конечно же не является ошибкой или существенным недостатком, но, тем не менее затрудняет восприятие изложенного в тексте диссертации.
2. При постановке задачи и обсуждении возможных подходов решения задач автор не счел необходимым обосновать почему в работе будут рассматриваться только прямолинейное и круговое движения строя БПЛА, для которых только, собственно, и построены алгоритмы управления.
3. В работе остался без внимания вопрос об алгоритмах управления строем БПЛА при переходе от прямолинейного движения к круговому и/или наоборот – от кругового к прямолинейному. Предположение, что прямолинейное и круговое движения строя БПЛА являются основными элементами полета строя, порождает вопрос насколько

- согласованными являются алгоритмы управления в этих режимах, что и как будет происходить при переходе от одного режима к другому.
4. Важным условием полета являются ветровые нагрузки на летательный аппарат, особенно на такой «легковесный» каким является БПЛА. К сожалению, в диссертации не уделено достойного внимания вопросу робастности предлагаемых алгоритмов к ветровым нагрузкам.
 5. Рассматривая алгоритмы управления строем, сохраняющие устойчивость и качество переходных траекторий БПЛА при формировании строя, автор не уделил внимание оптимальности таких траекторий.

Указанные замечания не опровергают результаты, полученные автором, а связаны с критическим рассмотрением рецензируемой диссертации, и не влияют на ее общую положительную оценку.

В целом, диссертационная работа написана хорошим научно-литературным языком, хорошо оформлена. В ней в лаконичной форме представлены весьма важные и новые научные результаты, имеющие большую теоретическую и прикладную ценность.

В качестве направления дальнейшего исследования следует рекомендовать исследования по применению метода неоднородного векторного поля для более сложных путей следования, например, посредством совмещения прямолинейных и круговых путей, выбора более сложных конфигураций путей и т.д.

Вывод: диссертационная работа Муслимова Т.З. является завершенной научной квалификационной работой, соответствует требованиям п. 9 и критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, содержит решение актуальной научной задачи – разработки методов и алгоритмов децентрализованного группового управления беспилотными летательными аппаратами самолетного типа, имеющей важное значение для развития системного анализа и теории управления, внедрение результатов работы автора внесет существенный вклад в развитие и эксплуатацию высокотехнологичных средств обороны страны. Автор диссертации – Муслимов Тагир Забинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 - Системный анализ, управление и обработка информации (информационные и технические системы).

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ

Заведующий кафедрой «Автоматические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет»,

доктор технических наук, профессор

 А.З. Асанов

« 7 » декабря 2020 г.

Асанов Асхат Замилович (докт. техн. наук, спец. 05.13.01)

Адрес: 117149, г. Москва, ул. Болотниковская, 36, 255

Телефон: раб.тел.+7 499 215 65 65 доп. 4014;

моб. тел. +7 915 061 0279

E-mail: a.z.asanov@yandex.ru

asanov@mirea.ru

