

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,  
ведущего научного сотрудника Чайковского Михаила Михайловича  
на диссертационную работу  
Казанина Дмитрия Константиновича  
«Методы и алгоритмы управления группой беспилотных  
летательных аппаратов при формировании строя»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 05.13.01 — Системный  
анализ, управление и обработка информации  
(в науке и промышленности)

Диссертационная работа Казанина Д.К. посвящена исследованию и развитию алгоритмов управления формированием строя группы беспилотных летательных аппаратов (БЛА), гарантирующих защиту от взаимных столкновений при формировании строя. Это направление исследований, научного и инженерного творчества является актуальным и лежит в русле современных тенденций развития теории и практики управления подвижными объектами. На протяжении последних двух десятилетий наблюдается резкое увеличение интереса мирового научно-технического сообщества к управлению сложными мультиагентными системами (МАС), состоящими из большого числа как правило однотипных объектов управления — агентов, цель которых заключается в достижении некоторого кооперативного взаимодействия в условиях отсутствия единого управляющего и координирующего центра. Такие системы характеризуются сложной структурой связей и взаимодействия между агентами, топология которого может быть переменной. Диссертация Казанина Д.К. сфокусирована на методах и алгоритмах управления МАС, обеспечивающих достижение так называемого консенсуса — согласования характеристик агентов, при этом особое внимание уделяется достижению консенсуса между агентами — группой БЛА — таким способом, чтобы гарантированно избежать их критического сближения и пересечения траекторий движения, т.е. столкновений. В диссертационной работе представлен метод решения задачи управления формированием строя БЛА, основанный на разбиении основной задачи на две взаимосвязанных подзадачи: слежение за виртуальным лидером группы, обеспечивающее требуемую формацию, и задачи предотвращения столкновений, решение которой основано на введении искусственных потенциальных полей вокруг всех агентов группы. В отличие от результатов, полученных ранее другими авторами для схожей постановки задачи, автор вводит в рассмотрение потенциальные поля (области безопасности) не цилиндрической, а сферической формы. Такой подход в теории управления МАС является новым и приводит к успешному решению задачи консенсуса при гарантированном избегании столкновений БЛА при формировании строя. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и довольно обширного списка литературы, который позволяет с доста-

точной степенью полноты оценить оригинальность работы и соотнести ее уровень с мировым.

В диссертации выполнен достаточно подробный обзор результатов, относящихся к теме диссертационной работы, обоснована актуальность и значимость темы исследования, сформулированы его цели и задачи. Дана общая характеристика полученных результатов, определена их научная новизна, а также раскрыто общее содержание работы и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы автором рассмотрен алгоритм формирования строя группы БЛА, основанный на решении задачи слежения за виртуальным лидером группы, движущимся по опорной (эталонной) траектории. Для решения задачи формирования строя минимизируются невязки координат каждого агента с заданными координатами опорной траектории при сохранении расстояний между любыми парами объектов не меньше заданного значения. Динамическая модель поведения каждого из агентов представлена в виде линейной (линеаризованной) системы дифференциальных уравнений седьмого порядка, достаточно высокого для традиционно рассматриваемых агентов МАС, как правило имеющих первый или второй порядок. Для решения задачи слежения за траекторией виртуального лидера автором разработана система стабилизации БЛА по продольному, боковому каналам и по каналу крена относительно опорной траектории, а также управления по каналу тяги. Регуляторы продольного и бокового каналов, а также канала крена БЛА представляют собой цифро-аналоговые устройства с аналоговыми контурами демпфирования и цифровыми контурами перегрузки и угла крена. В основе стабилизации по продольному и боковому каналу лежат пропорционально-дифференциальные законы управления, замыкание всех обратных связей контуров стабилизации осуществляется по информации датчиков первичной информации. Алгоритм управления в канале тяги разработан на основе нечеткой логики. Автором выполнено моделирование работы внутренних контуров стабилизации в переходных режимах при отработке скачкообразных заданных управлений для группы из трех агентов, а также формирование строя группой из шести агентов, запускаемых с одного носителя через равные временные интервалы. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предлагаемых автором алгоритмов стабилизации и управления.

Вторая глава диссертационной работы посвящена сравнению различных методов оценивания состояний группы агентов МАС при наличии шумов в измерительных каналах каждого из агентов, рассматриваемых как материальные точки на плоскости — упрощенные модели БЛА. Оценивание состояний агентов осуществляется с помощью градиентного метода с фиксированным шагом, а также с помощью централизованного и распределенного наблюдателей на основе фильтра Калмана. Централизованный наблюдатель строится для модели объекта управления (МАС) в виде централизованной системы, распределенный наблюдатель строится для каждого агента системы. На основе полученных оценок применяется управление МАС для формирования строя группой агентов. Модель объекта управления представляет собой систему линейных разностных

уравнений с постоянными коэффициентами относительно вектора состояния системы и с вектором измерений, включающим нелинейные компоненты — измерения радиальной дальности между агентами. Автором разработан алгоритм формирования строя агентами группы на основе нелинейных пропорционально-дифференциальных законов управления, минимизирующий невязку координат каждого объекта с координатами опорного объекта при постоянном ограничении на сближение агентов. Выполнено моделирование формирования строя группой из восьми агентов, подтверждающее работоспособность разработанных автором алгоритмов управления и методов оценивания состояний агентов.

В третьей главе диссертационной работы рассматривается разработанный автором алгоритм защиты от взаимных столкновений при формировании строя БЛА. Эта задача имеет чрезвычайно важное практическое значение. Предлагаемый алгоритм является развитием разработанного ранее известного метода искусственного потенциального поля. Новизна разработанного автором алгоритма заключается в том, что в нем область безопасности каждого агента определяется как сфера заданного радиуса (в отличие от цилиндрической области безопасности высотного канала в исходном методе). В рассматриваемой МАС каждый агент располагает информацией о текущих координатах и проекциях скорости виртуального лидера группы, а также обладает двунаправленным каналом связи с каждым агентом в сети. Суть разработанного автором метода заключается в том, что при обнаружении риска столкновения в системе управления каждого агента автоматически формируются управляющие сигналы для продольного и бокового каналов, а также канала тяги, в результате чего агенты отдаляются на безопасное расстояние. Алгоритм защиты от столкновений реализован индивидуально для каждого из каналов. Для предотвращения столкновений агентов в их продольные, боковые каналы и каналы тяги подаются управляющие сигналы, представляющие собой отрицательные градиенты искусственных потенциальных полей сферической формы. В результате управляющие сигналы действуют в сторону уменьшения потенциала и увеличения отклонения по высоте, бокового отклонения и отклонения в канале тяги между агентами в системе. Данные управляющие сигналы суммируются с управляющими сигналами для формирования строя (достижения консенсуса), рассматриваемыми в первой главе диссертации. Автором выполнено моделирование опасных сближений БЛА, подтверждающее эффективную работоспособность предлагаемых им алгоритмов защиты от столкновений, для групп БЛА, состоящих из двух и из трех агентов.

Диссертационная работа достаточно аккуратно оформлена, написана ясным языком. Список литературы весьма полон, представленный в диссертации ее обзор адекватно отражает состояние дел в исследуемой области, цитирование работ проведено тщательно.

По содержанию текста диссертационной работы имеются следующие замечания и вопросы:

1. В разделе 1.7 цифро-аналоговые регуляторы внутренних контуров стабилизации, представленные в разделах 1.5, 1.6, названы адаптивными. Однако, из этих разделов и математических выражений для построенных законов управления не следует, что они являются адаптивными. Краткое упоминание об адаптации имеется лишь в последнем предложении раздела 1.5, в котором не раскрыт алгоритм адаптивной настройки параметров регуляторов.
2. Во введении к диссертационной работе на стр. 10 сказано, что автором, в отличие от других исследователей, предложено частное решение задачи консенсуса группы подвижных объектов с использованием полной нелинейной модели объектов управления. Однако, система дифференциальных уравнений (1.1), рассматриваемая в работе как динамическая модель поведения каждого из агентов системы, линейная (линеаризованная), а нелинейная динамическая модель поведения агентов в работе отсутствует. Нелинейными являются законы управления продольным движением БЛА (1.2), (1.3), но закон управления боковым движением (1.5) также линейный.
3. На стр. 40 сказано, что предлагаемый градиентный метод определяет координаты с точностью до преобразований поворота и переноса. Из графиков рис. 25 видно, что различия между истинными траекториями агентов и их оценкам достаточно велики, более 4000 м по  $y$  и более 5000 м по  $x$ . Возникает вопрос: как определить указанные преобразования поворота и переноса для того, чтобы уменьшить различия между истинными траекториями и их оценками до приемлемых значений? Об этом в диссертационной работе не сказано ни слова.
4. В модели объекта в централизованной системе имеется нелинейный выход (2.4), который, видимо, подразумевается и в децентрализованной системе, хотя в тексте диссертационной работы выражения для измеряемых выходов агентов для децентрализованной МАС явно не приводятся. Но для оценивания состояния строится традиционный фильтр Калмана для линейной модели (2.15)–(2.17). Или матрица (2.13) — это аппроксимация якобиана? Что означает запись  $\frac{\delta(z_i - z_{i+k})}{\delta x}$ ,  $\frac{\delta(z_i - z_{i+k})}{\delta y}$  в выражении (2.13)? Это отношение приращений? Из текста работы это неясно.
5. Координаты истинных траекторий и их оценок на графиках рис. 26–28 на стр. 44 и 46 различаются на величины порядка от 1000 до 2000 м. Эти ошибки значительны. Можно ли устранить их? Если можно, то как? В тексте диссертационной работы об этом не сказано.
6. В выводах к главе 2 сказано, что в работе показана возможность компенсации ошибок задания местоположения и скорости. Из текста диссертации неясно, где именно показана такая возможность и каков алгоритм устранения ошибок. Второй вывод неочевиден и не связан с изложением главы 2. В третьем выводе речь идет об оптимальности

коэффициентов обратной связи. В каком смысле понимается оптимальность? Также в третьем выводе сказано, что все рассмотренные методы используют одну идею линейного рекуррентного наблюдателя. В градиентном методе, изложенном в разделе 2.6.1, о рекуррентном наблюдателе не сказано ни слова.

Учитывая важное практическое значение диссертации для инженерно-технической деятельности, а также то, что кандидатская диссертация является квалификационной работой, высказанные замечания не носят принципиальный характер и не снижают общего положительного впечатления от выполненной работы.

Диссертация Казанина Д.К. является завершенной научно-исследовательской и инженерной работой, которая вносит значительный вклад в теорию управления в направлении развития методов и алгоритмов управления формированием строя группы подвижных объектов и защиты от столкновений этих объектов в строю и имеет важное прикладное и практическое значение в технике.

Результаты диссертационной работы являются новыми. Они прошли апробацию на четырех всероссийских и одной международной конференциях достаточно высокого уровня. Все результаты, выносимые на защиту, опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК РФ или входящих в научную базу РИНЦ. Работа соответствует специальности 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и промышленности). Автореферат адекватно отражает основные положения диссертации.

По уровню своего содержания, объема и завершенности представленная квалификационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (в науке и промышленности), а ее автор, соискатель Казанин Д.К. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по этой специальности.

Ведущий научный сотрудник отделения 08  
ФГУП «Научно-производственный центр  
им. академика Н.А. Пилюгина», д.т.н.  
Адрес: 117342, г. Москва, ул. Введенского, д. 1  
Тел.: +7-(495)-535-34-06, e-mail: otd080@npcar.ru

М.М. Чайковский  
20.10.2017 г.

Подпись Чайковского М.М. заверяю  
Начальник отделения 08 ФГУП «Научно-  
производственный центр  
им. академика Н.А. Пилюгина», к.т.н.



Е.С. Смирнов