

Интеллектуальный алгоритм управления группой беспилотных аппаратов

М. А. Кудров, К. Д. Бухаров, Э. А. Захаров, Д. Р. Махоткин, Н. Е. Кривошеин,
Н. А. Гришин, В. Семенкин

Московский физико-технический институт, г. Москва, Россия

Аннотация. В статье представлен алгоритм группового управления летательными аппаратами в условиях динамически изменяющейся внешней ситуации. Задача группы беспилотных летательных аппаратов заключается в поиске и уничтожении вражеской группы аппаратов в ограниченном пространстве при минимально возможных потерях. Борьба с группами малых летательных аппаратов в условиях ограниченного пространства – одна из задач, возникших в последнее время в связи с развитием малоразмерной беспилотной летательной техники. Для исследования алгоритмов группового взаимодействия разработан программный стенд моделирования воздушного боя БПЛА и разработаны модули, реализующие несколько алгоритмов управления. В статье приведено описание программного стенда и результаты работы исследованных алгоритмов.

Ключевые слова: имитационная модель, идентификация состояния, функция полезности, генетический алгоритм, групповое управление, оптимизация.

DOI 10.14357/20718632190401

Введение

Применение беспилотных летательных аппаратов расширяется как в гражданской, так и в военной сферах [1]. Спектр функций, которые выполняют беспилотные летательные аппараты (БПЛА), достаточно широк – это и разведка, и слежение за объектами, и перехват, и уничтожение вражеских БПЛА [2], а также уничтожение целей на земле при помощи подвесного вооружения или при помощи управляемого самоподрыва [3]. Для управления беспилотными аппаратами традиционно применяются методы управления БПЛА, использующие различного типа эвристики [4], либо аппарат дифференциальных игр [5]. Однако в последние годы появился ряд работ, посвященных групповому управлению беспилотными лета-

тельными аппаратами [6], в них отмечено применение «неклассических» методов управления [8], получивших название *интеллектуальных*, таких как генетические алгоритмы [8, 9], алгоритмы нечеткой логики [10–12], роевые алгоритмы [13, 14], нейросетевые алгоритмы [15, 16]. Развитие вычислительной техники, сопровождающееся миниатюризацией аппаратных средств и увеличением вычислительной мощности, открывает возможность применения алгоритмов управления, требующих больших вычислительных ресурсов для работы в режиме реального времени. Применение таких алгоритмов определяет возможность дальнейшего развития в области управления БПЛА. В настоящей работе представлены результаты исследований по этой тематике с применением имитационного моделирования.

1. Программный стенд - симулятор воздушного боя

Для имитационного исследования алгоритмов группового управления беспилотными летательными аппаратами авторами разработан специализированный программный стенд, который моделирует физику полета БПЛА [17] в двумерном пространстве, симулирует физические взаимодействия моделей летательных аппаратов между собой и с объектами окружающей среды, а также каналов связи между объектами.

«Поле боя» представляет собой ограниченную область прямоугольной формы, при перемещении за границу которой модель БПЛА считается уничтоженной. Модель летательного аппарата отражает основные возможности БПЛА самолетного типа и соответствующие характеристики: скорость движения в допустимом диапазоне, уменьшение энергии движения при виражах, ограничение максимальной скорости поворота. Математическая модель движения представлена ниже:

$$\begin{aligned} \dot{v} &= a_1 \cdot U_{vel} - a_2 \cdot |\omega| \cdot v - a_3 \cdot v + W_{min}; \\ W_{min} &= \{0, v > v_{min}; a_4 \cdot |v - v_{min}|, v \leq v_{min}\} \\ \dot{\omega} &= b_1 \cdot U_{turn} - b_2 \cdot \omega, \end{aligned}$$

где $a_1 \cdot U_{vel}$ – отклик на управляющее воздействие «газ/тормоз», $-a_2 \cdot |\omega| \cdot v$ – сопротивление повороту, $-a_3 \cdot v$ – сопротивление движению, W_{min} – поддержание минимальной скорости. $b_1 \cdot U_{turn}$ – отклик на поворот, $-b_2 \cdot \omega$ – сопротивление повороту.

Управление производится с помощью изменения двух параметров, отвечающих за скорость и поворот вокруг оси.

Управление скоростью осуществляется посредством задания параметру U_{vel} значения из вещественного отрезка $[0, 1]$, интерпретирующего диапазон значений «отсутствие тяги / полный газ». При присвоении этому управляющему параметру значения 0 при прямолинейном движении скорость модели летательного аппарата стремится к минимальной скорости аппарата V_{min} ; при задании U_{vel} значения 1 скорость стремится к максимальной скорости V_{max} .

Управление поворотом осуществляется путем изменения параметра U_{turn} в вещественном диапазоне значений $[-1, 1]$. Этот параметр

отражает изменения угловой скорости модели. Присвоение U_{turn} значения -1 означает поворот по часовой стрелке с максимальной угловой скоростью $\omega = \omega_{max}$; $U_{turn} = 1$ означает поворот против часовой стрелки с максимальной угловой скоростью.

Построенная таким образом математическая модель реализует поведение типа «самолет». Модель испытывает сопротивление движению пропорционально скорости, что, в целом, отражает характер сопротивления воздуха. Достижение максимальной скорости происходит плавно [18]. При поворотах происходит уменьшение скорости в зависимости от поступательной и угловой скорости, что необходимо для реализаций тактик боя с превосходством над противником по скорости [19].

Каждая модель ЛА геометрически представляет собой круг радиусом r_{obj} , и считается, что произошло столкновение двух объектов, если расстояние между двумя объектами становится меньше $2r_{obj}$.

В симуляции воздушного боя участвуют две команды. Участники каждой из команд стремятся уничтожить противников. «Уничтожение» происходит, когда объект находится «сзади» противника на расстоянии не больше радиуса поражения R_{kill} и так, чтобы угол α между направлениями движения объектов и угол β между вектором, соединяющим центры объектов, и вектором направления собственного движения были меньше установленного значения ϕ_{kill} . Данное пространственное положение продемонстрировано на Рис. 1.

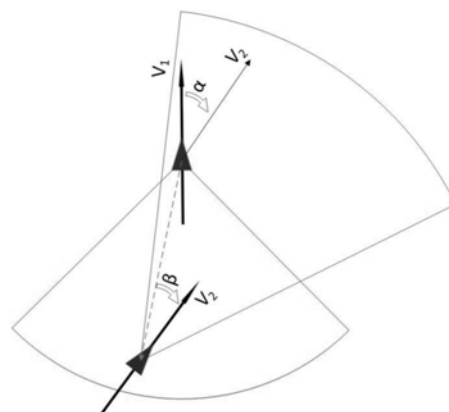


Рис. 1. Условие уничтожения противника

Воздушный бой длится не дольше заранее установленного времени, и если по истечении этого времени на поле боя присутствуют участники из обеих команд, то объявляется ничейный исход боя. Также ничейный исход наступает, если все объекты уничтожены. Победа присуждается одной из команд, если все противники уничтожены, и на поле боя присутствует хотя бы один член группы.

2. Базовый алгоритм управления

Для оценки эффективности различных алгоритмов управления создан базовый алгоритм, реализующий поведение активных мишеней. Базовый алгоритм представляет собой алгоритм, реализующий набор сценариев поведения для совокупности состояний управляемого объекта. Переход объекта в одно из состояний из выбранного набора продуцирует определенное заранее действие, то есть реализует одно из утвержденных продукционных правил [20]. Например, в случае приближения к стене на критическое расстояние модель принимает состояние “опасность столкновения со стеной” и производится маневр уклонения от столкновений. Когда же расстояние до стены увеличивается до безопасного, объект вновь переходит в состояние “поиск целей”. Модели БПЛА, осуществляющие перемещение согласно этому алгоритму, обладают возможностью:

- уклоняться от столкновений с противниками и союзниками, избегать покидания поля боя;
- выбирать ближайшего противника и производить маневр уничтожения;
- выявлять опасное приближение противника и выполнять маневр уклонения.

Маневр уничтожения [21] осуществляется путем следования по направлению к точке, расположенной позади противника на установленном расстоянии. Принцип выполнения маневра проиллюстрирован на Рис. 2. Практическое применение данного алгоритма показывает, что для моделей ЛА типа “самолет” для всех возможных конфигураций взаимного расположения происходит поражение противника; в ситуации, когда противники движутся встречным курсом, после сближения с противником производится маневр уклонения, после которого модель ЛА производит маневр уничтожения.

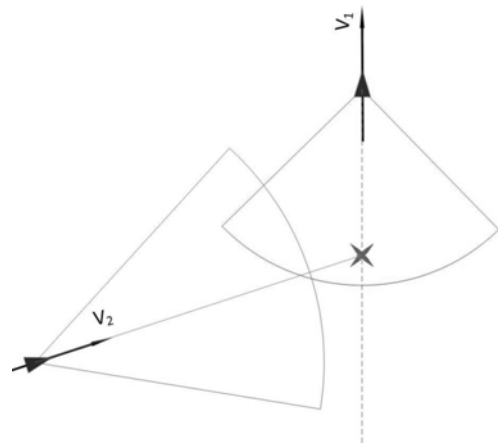


Рис. 2. Выполнение выхода на атаку

Управляемая посредством такого базового алгоритма модель побеждает в более чем 90% случаев в тестовых боях с управляемой человеком моделью.

3. Алгоритм управления, основанный на максимизации функции полезности

В основе алгоритма управления моделью ЛА, реализующего интеллектуальный подход к управлению, лежит принцип оптимизации *функции полезности* для идентификации состояния управляемого объекта [22] по таким параметрам, как пространственное положение относительно противников, союзников и препятствий. Кроме того, предполагается, что сохранение энергии БПЛА также влияет на эффективность маневров. Управление, таким образом, осуществляется согласно следующему алгоритму:

- определяется оценка функции полезности для текущего состояния,
- осуществляется краткосрочный прогноз состояния при исполнении возможных управляющих воздействий,
- определяется оценка функции полезности для возможных состояний,
- осуществляется выбор того управляющего воздействия, которое приводит к максимуму функции полезности.

Функция полезности определяется как аддитивная функция вида:

$$Q = a_1 * q_1 + a_2 * q_2 + a_3 * w + a_4 * s.$$

Здесь q_1 - функция полезности для оценки пространственного положения относительно

противников, q_2 - функция полезности для оценки пространственного положения относительно союзников, w - функция полезности для оценки пространственного положения относительно препятствий, s - функция полезности, учитывающая скорость управляемого объекта, a_1, a_2, a_3 , - весовые коэффициенты.

Функция полезности для параметра «взаимное расположение со всеми союзниками» может быть упрощена, если учитывать только пространственное положение ближайшего из союзников. Компонента q_2 для взаимного расположения с противниками также учитывается только по одному из противников, выбор которого производится системой распределения целей.

Функция полезности для «пространственного расположения ЛА» - это функция трех переменных $q = q(R, \alpha, \beta)$, где R - расстояние между центрами объектов, α - угол между векторами скорости двух объектов, β - угол между вектором скорости первого ЛА и вектором, соединяющим центры первого и второго ЛА. Компонента w - функция одной переменной $w = w(r)$, где r - минимальное из расстояний до препятствий. Компонента s - функция, зависящая от скорости объекта $s = s(v)$.

Распределение целей между летательными аппаратами группы осуществляется в соответствии с одним из алгоритмов *целераспределения*. Эти алгоритмы не учитывают внутренние свойства объектов и опираются только на информацию о количестве союзных и вражеских ЛА, их положение и ориентацию. Среди возможных алгоритмов рассматриваются следующие:

- “Все на одного”: всем союзникам указывается один и тот же случайно выбранный вражеский объект в качестве цели; после его уничтожения происходит назначение нового случайно выбранного вражеского ЛА в качестве цели;

- “Динамический выбор цели”: в начале боя не происходит назначения цели, каждый объект следует за той целью, уничтожение которой оценивается алгоритмом как наиболее вероятное в данный момент времени;

- “Статический выбор цели”: каждому союзному объекту в начале боя назначается по одной цели, при ее поражении производится назначение новой цели.

4. Настройка алгоритма управления

Первоначальная настройка всех компонент функции полезности и значений числовых параметров осуществляется эмпирически, с опорой на общее понимание тактики боя и маневренных возможностей моделей БПЛА. Непрерывность функций обеспечивается линейной интерполяцией по значениям дискретной функции в окрестности интересующей точки.

Функция q_1 , отражающая оценку положения БПЛА относительно противника, построена на основании следующих положений:

- функция полезности достигает максимального значения в положении, когда противник находится впереди и следует в том же направлении;

- функция полезности достигает минимального значения, когда противник находится позади и следует в том же направлении;

- функция полезности возрастает при уменьшении расстояния до противника до тех пор, пока расстояние не меньше критического, означающего опасное сближение.

Построение функции q_2 оценки взаимного положения с союзными объектами опирается на следующую интерпретацию тактики:

- сближение с союзником означает уменьшение функции полезности, если расстояние между объектами меньше критического, означающего опасное сближение;

- движение встречным курсом означает уменьшение функции полезности при уменьшении расстояния;

- на большом удалении пространственная ориентация союзника не имеет значения.

Для компоненты w , отвечающей за оценку местоположения относительно препятствий, значение функции полезности остается постоянным при удалении БПЛА от препятствия на расстояние, большее некоторого критического. При приближении к препятствию на расстояние меньшее критического функция полезности экспоненциально убывает при уменьшении расстояния.

Функция полезности s возрастает при увеличении скорости линейным образом.

Весовые коэффициенты a_1, a_2, a_3, a_4 подобраны эмпирически так, чтобы поведение управляемых БПЛА было нацелено на актив-

ную борьбу с объектами-противниками с достаточной степенью осторожности, обеспечивающей безопасное маневрирование в условиях ограниченного пространства и плотного заполнения поля боя как союзными, так и вражескими объектами.

Эффективность алгоритма оценивается статистически по результатам 1000 симуляций боев между командой, состоящей из четырех управляемых базовым алгоритмом моделей БПЛА, и командой из четырех моделей, управляемых предложенным авторами алгоритмом. Оценка эффективности производится для трех алгоритмов целераспределения. Результаты, отображенные на Рис. 3, демонстрируют эффективность алгоритма управления для значений параметров, которые были получены, исходя из общих представлений о тактике боя. На графиках изображены соотношения побед/ничьих/поражений команды, управляемой описанным алгоритмом, по сравнению с действиями команды, управляемой базовым алгоритмом.

5. Оптимизация управления

Оптимизация управления осуществляется на основе настройки предложенного алгоритма посредством эволюционного отбора [23, 24]. Значения компонент функции полезности и весовых коэффициентов преобразуются в единый вектор, который интерпретируется как «геном». Размерность «генома» в рассматриваемом случае составляет величину порядка 10000.

Значения компонент функции полезности и весовых коэффициентов, полученные при ручной настройке алгоритма, используются как опорные для построения *первоначального генома*. В *первую эпоху* оптимизации первоначальный геном используется для генерации 100 новых геномов, полученных при помощи небольших случайных изменений компонент. Для всех вариаций генома производится большое количество симуляций боев. Среди всех *мутаций* генома отбирается тот, который обеспечивает наибольшую эффективность по значению функции приспособленности. Этот геном используется как опорный для *новой эры* эволюционного отбора.

Функция приспособленности, используемая при оптимизации, должна адекватно отоб-

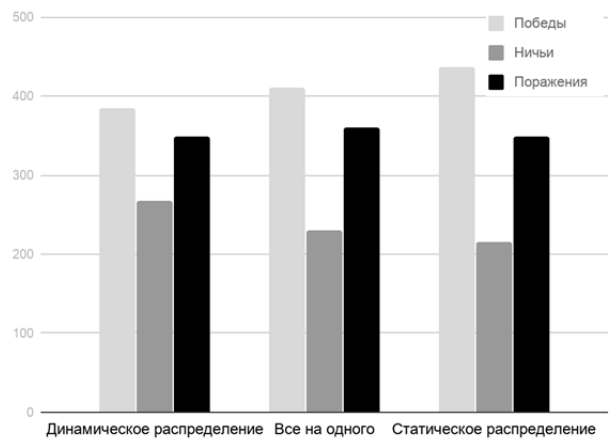


Рис. 3. Оценка эффективности алгоритма управления, основанного на максимизации функции полезности

ражать исход большого количества симуляций боев и показывать улучшение или ухудшение работы алгоритма. Ценность «победы» больше, чем «ничьей», ценность «ничьей» больше ценности «поражения». Кроме того, более эффективным считается алгоритм, представляющий выигрыш по быстрдействию. Предлагается следующий вид *функции приспособленности*:

$$F = \frac{(W - 0.5 \cdot D - L)}{N} - \frac{0.1 \cdot \sum_{i=1}^N t_i}{N \cdot T},$$

где N - общее количество произведенных симуляций боев, W - количество побед, D - количество ничьих, t_i - время, затраченное на симуляцию боя, T - максимальное время одного боя.

Для трех алгоритмов целераспределения проведена оптимизация всех компонент функции полезности. Результаты симуляционных экспериментов показали существенный прирост эффективности алгоритма управления. Среди трех алгоритмов целераспределения наиболее эффективным оказался «статический выбор цели», далее следуют, соответственно, «все на одного» и «динамический выбор цели». В процессе настройки алгоритмов обнаружилось, что управляемые объекты начинают реализовывать некоторые тактические приемы, не заложенные изначально в алгоритм управления. Алгоритм управления «подстраивается» под особенности базового алгоритма, используя такие тактические уловки для уничтожения противников, как движение на максимальной скорости к границе области и последующее резкое

торможение с уходом в сторону или выход в лобовую атаку на одного врага, когда другой преследует на небольшом расстоянии сзади.

На Рис. 4 - Рис. 6 представлена динамика прироста эффективности алгоритмов управления для различных методов целераспределения.

Заключение

Область исследования групповых взаимодействий ЛА является перспективным и практически значимым направлением. К нему относятся, в том числе, задачи группового управления беспилотными летательными аппаратами, исследование некоторых аспектов которых проводилось в рамках описанной в данной статье работы.

Для исследования алгоритмов управления разработан программный стенд для имитационного моделирования воздушного боя в условиях ограниченного пространства. Стенд реализует имитационную модель динамики управляемых объектов и применим для количественной оценки качества работы алгоритмов группового управления.

Реализован базовый алгоритм, включающий в себя набор детерминированных действий для определенных моделей поведения и использующийся для управления контрольной группы объектов-мишеней.

Реализован алгоритм управления, реализующий поиск максимума функции полезности. Поиск осуществляется посредством генетического алгоритма. В результате настройки алгоритма получен прирост эффективности до 30% для различных алгоритмов целераспределения.

Показано, что наиболее эффективным алгоритмом среди трех рассмотренных алгоритмов целераспределения для системы группового управления является алгоритм “статический выбор цели”.

Дальнейшее развитие исследований предполагает модификацию разработанной модели с целью повышения реалистичности динамики движения объектов, разработку алгоритмов управления, реализующих иные представления функции полезности и методы ее оптимизации, конкурентное обучение алгоритмов управления для определения наиболее эффективных.

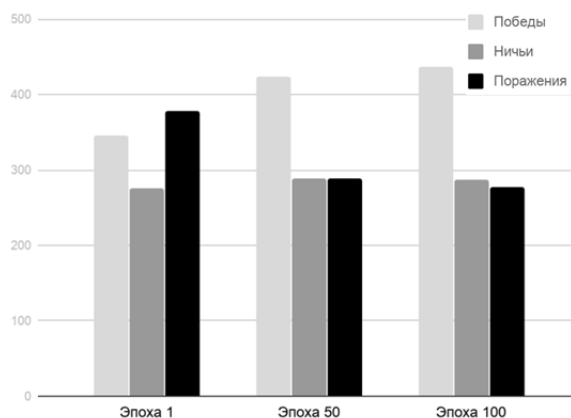


Рис. 4. Эффективность алгоритма целераспределения “динамический выбор цели”

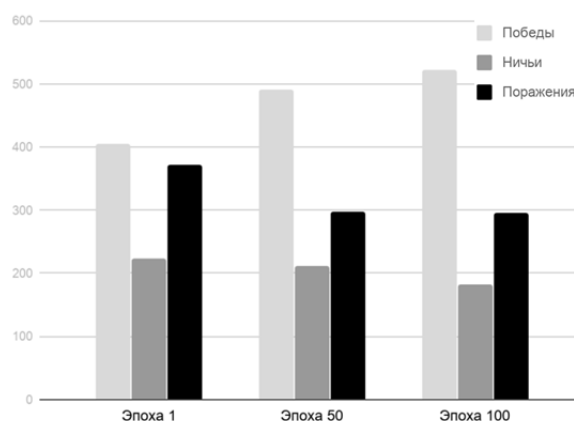


Рис. 5. Эффективность алгоритма целераспределения “все на одного”

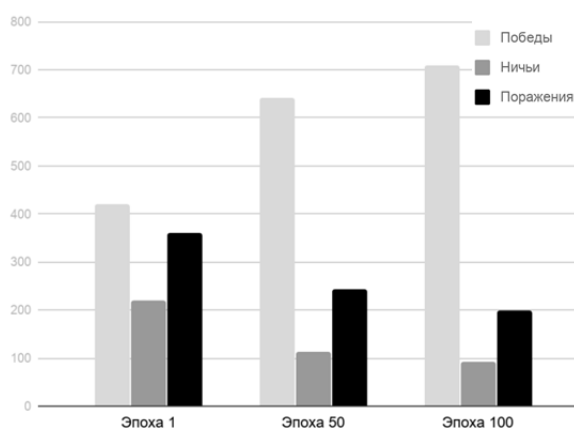


Рис. 6. Эффективность алгоритма целераспределения “статический выбор цели”

Литература

- Novitzky P., Kokkeler B., Verbeek P. The Dual-use of Drones *Tijdschrift voor Veiligheid* 2018 (17) 1-2 doi: 10.5553/TvV/18727948201801710200
- Bunker R. J. Terrorist and insurgent unmanned aerial vehicles: use, potentials, and military implications // *Strategic Studies Institute and U. S. Army War College Press*, 2015.
- Копытин В. Война дронов. Почему террористы в Сирии всё чаще используют беспилотники? // LIFE [Электронный ресурс] 2018, URL: https://life.ru/t/сирия/1076718/voina_dronov_pochemu_terroristy_v_sirii_vsio_chashchie_ispolzuiut_biespilotniki (дата обращения: 09.06.2019).
- Петросян Л.А., Рихсиев Б.Б. Преследование с простым движением. М.: Наука, 1991. - 96 с.
- Айзекс Р. Дифференциальные игры. М.: Мир, 1967. - 480 с.
- Majumdar D. U.S. Military Successfully Tested Its Latest Super Weapon: 'The Swarm' // *The National Interest* [Электронный ресурс] - 9.01.2017 - URL: <https://nationalinterest.org/blog/the-buzz/us-military-successfully-tested-its-latest-super-weapon-%E2%80%98the-19002> (дата обращения: 09.06.2019).
- Zulu A., John S. A. Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors // *Open Journal of Applied Sciences*, 2014 - 10 с.
- Khuwaja K., Lighari N., Tarca I. C., Tarca R. C. PID Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms for a Quadcopter // *Recent Innovations in Mechatronics (RIIM) Vol. 5. (2018). No. 1.*
- Galvez R. L., Dadios E. P., Bandala A. A. Path Planning for Quadrotor UAV Using Genetic Algorithm // *7th IEEE International Conference Humanoid*, 2014 - 5 с.
- Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. - 2-е изд. - М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. - 798 с. (Andrzej P., 2001. *Fuzzy Modeling and Control*. Physica-Verlag Heidelberg. 728 p.)
- Talha M., Asghar F., Rohan A., Rabah M., Kim S. H. Fuzzy Logic-Based Robust and Autonomous Safe Landing for UAV Quadcopter // *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018 - 13 с.
- Ernest N., Carroll D., Schumacher C., Clark M., Cohen K., Lee G. Genetic Fuzzy based Artificial Intelligence for Unmanned Combat Aerial Vehicle Control in Simulated Air Combat Missions // *Journal of Defense Management*, 2016. - 7 с.
- Водолазский И. А., Егоров А. С., Краснов А. В. Роевой интеллект и его наиболее распространённые методы реализации // *Молодой ученый*. — 2017. — №4. — С. 147-153. — URL: <https://moluch.ru/archive/138/38900/> (дата обращения: 9.06.2019).
- Иванов Д. Я. Методы роевого интеллекта для управления группами малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*, 2011 - 9 с.
- Кореванов С. В., Казин В. В. Искусственные нейронные сети в задачах навигации беспилотных летательных аппаратов // *Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации*, 2014 - 4 с.
- Amer K., Samy M., Shaker M., ElHelw M. Deep Convolutional Neural Network-Based Autonomous Drone Navigation // *Center for Informatics Science*, 2019 - 8 с.
- Hostmark J. B. Modelling Simulation and Control of Fixed-wing UAV: *CyberSwan* // *Institutt for teknisk kybernetikk*, 2007 - 106 с.
- Бесекерский В.А., Попов Е.П. 4-е изд // *Теория систем автоматического управления*. — СПб.: Профессия, 2003. — 752 с.
- Петров В. Маневрирование в воздушном бою. // *Зарубежное военное обозрение*, N1, 1985 [Электронный ресурс] - 9.01.2017 - URL: <http://lockon.spb.ru/manevr.html> (дата обращения: 9.06.2019).
- Подзоров С. Ю. Курс лекции по теории алгоритмов НГУ, 2003 – 2004.
- Бабищ В. К. Воздушный бой (зарождение и развитие) // *Военное издательство*, 1991 - 95 с.
- Rubinstein A. *Lecture Notes in Microeconomic Theory*. — 2nd. — Princeton University Press, 2013. — 153 с. — ISBN 978-0-691-15413-8.
- Климко Е. Г. Генетический алгоритм как разновидность эволюционного алгоритма // *Радиоэлектроника и информатика*, 2002 - 4 с.
- Батищев Д.И., Неймарк Е.А., Старостин Н.В. Применение генетических алгоритмов к решению задач дискретной оптимизации // *Учебно-методический материал по программе повышения квалификации «Информационные технологии и компьютерное моделирование в прикладной математике» Нижний Новгород*, 2007. - 85 с.

Бухаров Кирилл Дмитриевич. Московский физико-технический институт г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Количество печатных работ: 12. Область научных интересов: анализ данных, машинное обучение, компьютерное зрение, численное моделирование.

Гришин Никита Александрович. Московский физико-технический институт г. Москва, Россия. Техник. Область научных интересов: распознавание образов, компьютерное зрение.

Захаров Эдуард Александрович. Московский физико-технический институт г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Количество печатных работ: 4. Область научных интересов: теория управления, идентификация, компьютерное моделирование. E-mail: eddyzaharov@gmail.com

Кривошеин Николай Евгеньевич. Московский физико-технический институт г. Москва, Россия. Техник. Область научных интересов: компьютерное моделирование, разработка искусственного интеллекта. E-mail: nick7@inbox.ru

Кудров Максим Александрович. Московский физико-технический институт г. Москва, Россия. Старший научный сотрудник. Количество печатных работ: 45. Область научных интересов: математическое и численное моделирование, аэродинамика.

Махоткин Даниил Русланович. Московский физико-технический институт г. Москва, Россия. Техник. Область научных интересов: анализ данных, компьютерное зрение, распределенные вычисления, компьютерное моделирование. E-mail: daniil.mahotkin@mail.ru

Семенкин Влад Глебович. Московский физико-технический институт г. Москва, Россия. Научный сотрудник. Область научных интересов: компьютерное моделирование, аэродинамика, анализ данных.

Intelligent control algorithm for a group of unmanned aerial vehicles

M. A. Kudrov, K. D. Bukharov, E. A. Zakharov, D. R. Mahotkin, N. E. Krivoshein,
N. A. Grishin, V. Semenkin

Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

Abstract. This article covers the algorithm of group control of aircraft in a dynamically changing environment. The task of the group of unmanned aerial vehicles (UAVs) is (the as one type of search) independent search and destruction of enemy group of vehicles in a limited space with minimal loss. The fight against groups of small aircraft in a limited space is one of the problems that have arisen in recent years in relation to the development of small unmanned aerial vehicles. Currently, it is necessary to elaborate the theoretical and practical basis in the field of ground control of unmanned aerial vehicles for the successful solution of the tasks. In order to study of algorithms of group interaction the software stand modeling air fight was developed, and the modules realizing classical and adaptive algorithms of management were prepared. There are a description of the software stand and results of the studied algorithms in the article.

Keywords: mathematical model, state assessment function, utility function, genetic algorithm, group control, optimization.

DOI 10.14357/20718632190401

References

1. Novitzky P., Kokkeler B., Verbeek P. The Dual-use of Drones Tijdschrift voor Veiligheid 2018 (17) 1-2 doi: 10.5553/TvV/18727948201801710200
2. Bunker R. J. 2015. Terrorist and insurgent unmanned aerial vehicles: use, potentials, and military implications // Strategic Studies Institute and U. S. Army War College Press.
3. Kopytin V. 2018. Voyna dronov. Pochemu terroristy v Sirii vso chashche ispol'zuyut bespilotniki? [Why are terrorists in Syria increasingly using drones?] // LIFE. Available at: https://life.ru/t/сирия/1076718/voyna_dronov_pochemu_terroristy_v_sirii_vsio_chashchie_is_polzuiut_biespilotniki (accessed June 09, 2019).
4. Petrosyan L.A., Rikhsiyev B.B. 1991. Presledovanie s prostym dvizheniyem [Chasing with a simple movement]. Moscow: The science. 96 p.
5. Ayzeks R. 1967. Differential'nnyye igry [Differential Games]. Moscow: World. 480 p.
6. Majumdar D. 2017. U.S. Military Successfully Tested Its Latest Super Weapon: 'The Swarm' // The National Interest. Available at: <https://nationalinterest.org/blog/the-buzz/us-military-successfully-tested-its-latest-super-weapon-%E2%80%98the-19002> (accessed June 09, 2019).
7. Zulu A., John S. A. 2014. Review of Control Algorithms for Autonomous Quadrotors // Open Journal of Applied Sciences. 10 p.
8. Khuwaja K., Lighari N., Tarca I. C., Tarca R. C. 2018. PID Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms for a Quadcopter // Recent Innovations in Mechatronics (RIIM) Vol. 5. (2018). No. 1.
9. Galvez R. L., Dadios E. P., Bandala A. A. 2014. Path Planning for Quadrotor UAV Using Genetic Algorithm // 7th IEEE International Conference Humanoid. 5 p.
10. Andrzej P., 2001. Fuzzy Modeling and Control. Physica-Verlag Heidelberg. 728 p.
11. Talha M., Asghar F., Rohan A., Rabah M., Kim S. H. 2018. Fuzzy Logic-Based Robust and Autonomous Safe Landing for UAV Quadcopter // Arabian Journal for Science and Engineering. 13 p.
12. Ernest N., Carroll D., Schumacher C., Clark M., Cohen K., Lee G. 2016. Genetic Fuzzy based Artificial Intelli-

- gence for Unmanned Combat Aerial Vehicle Control in Simulated Air Combat Missions // *Journal of Defense Management*. 7 p.
13. Vodolazskiy I. A., Yegorov A. S., Krasnov A. V. 2017. Royevoy intellekt i yego naiboleye rasprostranennyye metody realizatsii [Swarm intelligence and its most common implementation methods]. // *Young scientist*. p. 147-153. Available at: <https://moluch.ru/archive/138/38900/> (accessed June 09, 2019).
 14. Ivanov D. Y. 2011. Metody royeвого intellekta dlya upravleniya gruppami malorazmernykh bespilotnykh letatel'nykh apparatov [roya intelligence methods for managing groups of small unmanned aircraft]. *Izvestiya Southern Federal University. Technical science*. 9 p.
 15. Korevanov S. V., Kazin V. V. 2014. Iskusstvennyye neyronnyye seti v zadachakh navigatsii bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Artificial neural networks in the problems of navigation of unmanned aircraft]. *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University of Civil Aviation*. 4 p.
 16. Amer K., Samy M., Shaker M., ElHelw M. 2019. Deep Convolutional Neural Network-Based Autonomous Drone Navigation // *Center for Informatics Science*. 8 p.
 17. Hostmark J. B. 2007. Modelling Simulation and Control of Fixed-wing UAV: CyberSwan // *Institut for teknisk kybernetikk*. 106 p.
 18. Besekerskiy V. A., Popov Y. P. 2003. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of automatic control systems]. Saint Petersburg: Profession. 752 p.
 19. Petrov V. 2017. Manevrovaniye v vozdušnom boyu. [Maneuvering in aerial combat]. *Foreign military review* Available at: <http://lockon.spb.ru/manevr.html> (accessed June 09, 2019).
 20. Podzorov S. Y. 2004 *Kurs leksii po teorii algoritmov NGU* [Lecture course on the theory of algorithms of NSU].
 21. Babich V. K. 1991. *Vozdushnyy boy (zarozhdeniye i razvitiye)* [Air combat (origin and development)]. Military publishing house. 95 p.
 22. Rubinstein A. 2013. *Lecture Notes in Microeconomic Theory*. — 2nd. — Princeton University Press. — 153 p. — ISBN 978-0-691-15413-8.
 23. Klimko Y. G. 2002. Geneticheskii algoritm kak raznovidnost' evolyutsionnogo algoritma [genetic algorithm as a variety of evolutionary algorithm]. *Electronics and Informatics*. 4 p.
 24. Batishchev D.I., Neymark Y. A., Starostin N.V. 2007. *Primeneniye geneticheskikh algoritmov k resheniyu zadach diskretnoy optimizatsii* [Application of genetic algorithms to solving discrete optimization problems]. Educational material on the continuing education program "Information Technologies and Computer Modeling in Applied Mathematics" Nizhny Novgorod. 85 p.

Bukharov K. D. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia. Senior Researcher. Number of publications: 4. Research interests: data analysis, machine learning, computer vision, numerical modeling.

Grishin N. A. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia. Technician. Research Interests: pattern recognition, computer vision.

Krivoshein N. E. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia. Technician. Research interests: computer modeling, artificial intelligence, e-mail: nick7@inbox.ru

Kudrov M. A. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia. Senior Researcher. Number of publications: 45. Research interests: mathematical and numerical modeling, aerodynamics.

Mahotkin D. R. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia. Technician. Research interests: data analysis, computer vision, distributed computing, computer modeling, e-mail: daniil.mahotkin@mail.ru.

Semenkin V. G. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia. Researcher. Research Interests: computer modeling, aerodynamics, data analysis.

Zakharov E. A. Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia. Researcher. Number of publications: 4. Research interests: system control theory, identification, computer modeling. e-mail: eddyzaharov@gmail.com (Responsible for correspondence).