

УПРАВЛЕНИЕ РОЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ПОМЕХ

CONTROLLING A SWARM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN HIGH INTERFERENCE CONDITIONS

**A. Tolmachev
D. Kuksenok**

Summary. The article provides an analysis of possible solutions to the problem of self-organization of a group of unmanned aerial vehicles, in a situation of lack of communication both with the command post and between swarm agents. The description of possible control algorithms in conditions of high interference is presented, the simulation of the swarm operation during the study of the territory and the loss of communication with one or more agents is implemented. The main stages of self-organization of swarm agents when working offline are highlighted. Approaches are described that increase the efficiency of swarming in the tasks of studying the territory when observing dynamic objects and the absence of an expert observer.

Keywords: swarm intelligence, artificial intelligence, interference, vision system, control algorithm, territory research.

Толмачев Александр Сергеевич

Аспирант, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
pifonepaf@gmail.com

Куксенок Даниил Сергеевич

Аспирант, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
kdsflash@gmail.com

Аннотация. В статье приведен анализ возможных решений задачи самоорганизации группы беспилотных летательных аппаратов, в ситуации отсутствия связи как с командным пунктом, так и между агентами роя. Представлено описание возможных алгоритмов управления в условиях высоких помех, реализовано моделирование работы роя при исследовании территории и утери связи с одним или несколькими агентами. Выделены основные этапы самоорганизации агентов роя при работе в автономном режиме. Описаны подходы, увеличивающие эффективность роя в задачах исследования территории при наблюдении динамических объектов и отсутствия наблюдателя-эксперта.

Ключевые слова: роевой интеллект, искусственный интеллект, помехи, система технического зрения, алгоритм управления, исследование территории.

Использование роевого интеллекта для решения задач самоорганизации различных систем имеет широкое применение [1]. Однако, такой подход зачастую может не учитывать экстремальную ситуацию, и не имеет алгоритмического механизма для решения такого рода задач. В данной работе рассматриваются возможные решения задач самоорганизации роя БЛА в ситуациях с ограничением связи между командным пунктом и роем, а также между агентами. Представлены методы самоорганизации на сборочных пунктах, установленных непосредственно РИ, метод пересчета агентов роя при изменении количество агентов в отсутствие связи.

В работе также рассматривается применение распределенной системы технического зрения в задачах исследования территории, принципы построения таких систем, их преимущества. Вопросы использования такого рода подхода для группы БЛА, управляемой роевым интеллектом.

1. ВХОДНЫЕ УСЛОВИЯ

При исследовании территории на участке помех, необходимо организовать такой алгоритм работы, что, при прохождении части от общей площади исследования — ΔS , передача пакета данных о местности и обнаруженных объектах может быть осуществлена отправкой одного из агентов с пакетом данных за пределы действия помех. В то же время, в случае, когда обнаружена станция помех или любой другой объект, имеющий высший приоритет обнаружения, а площадь исследованной территории меньше чем ΔS , один или несколько агентов вне очереди должны быть отправлены за территорию действия помех, для передачи данных. Данные правила направлены на передачу актуальных данных в случае высокой угрозы уничтожения группы БПЛА.

При работе группы БПЛА в зоне помех, необходимо учитывать, что устройства GPS, и другая спутниковая

связь не доступны. Дальность стабильного информационного обмена между агентами может сократиться или отсутствовать вовсе [2][3].

2. Роевой интеллект

В качестве задачи, решаемой роем, предлагается исследование территории. Для множества роботов R $r_i (i=1,2, \dots, N)$, совместное воздействие которых приведет к решению задачи, справедливы следующие допущения[4]:

- ◆ Все агенты роя R имеют одинаковое аппаратно-техническое обеспечение;
- ◆ Состояние каждого агента роя R описывается некоторым вектором v_i ;
- ◆ Агент роя R может выполнять ограниченный набор действий, ведущий к изменению состоянию вектора v_i , определяемый векторами $A_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in}\}$;
- ◆ Агент может осуществлять обмен данными с некоторыми роботами, принадлежащими рою, находящимися в зоне радиусом L , обмениваться данными о состоянии агентов и их действиях. При этом, у каждого агента есть зона радиусом Q , в которой он эффективно исследует территорию. Примем что $Q > L$, так как предполагается воздействие, создающее помехи;
- ◆ Каждый агент роя знает алгоритмы для изменения своего состояния в зависимости от выполняемых им действий, а также возможности других агентов, принадлежащих рою. С учетом предыдущего пункта можно сделать вывод что:

$$\frac{dv_i}{dt} = f(v_i, A_i, v_{i1}, A_{i1}, \dots, v_{in}, A_{in});$$

- ◆ Под задачей, стоящей перед роем, предполагается разведка и патрулирование территории, представленной в виде вектора M . В состав вектора входит параметр координат начала квадрата территории x_{0i} , а также ширина h_0 и длина w_0 исследуемой территории. Учитывая предыдущие пункты, решение задачи исследования территории можно записать как множество последовательностей действий всех агентов $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i\}$, которое преобразует начальное состояние роя V_0 в состояние, соответствующее поставленной задаче S_{er} , в котором достигается минимум функционала $Y = F_b(s_1, s_2, \dots, s_i)$. Тогда, решением задачи будет множество действий S_{ur} , которые приведут к такому множеству состояний A_{ur} , что множество оптимальных для посещения агентами точек $M_{ur} = \{x_{0i}, x_{1i}, \dots, x_{ni}\} \in A_{ur}$ при этом оптимальное расстояние между позициями $L/2$;

- ◆ С учетом предыдущего пункта, состояния и действия роботов $R_i \subset R$, попадающих в зону видимости робота r_i , будут $s_{ij}, A_{ij} (j=1,2,\dots, Q)$;
- ◆ Ввиду симуляции экстремальных условий, значение Q может изменяться от Q_{max} до Q_{min} , где $Q_{min} > 0$, а также количество агентов N может меняться от N_{max} до N_{min} , где $N_{max} > N_{min} > 0$;

Предлагается использовать следующий алгоритм взаимодействия агентов [4]:

1. Все агенты из состава роя, получают исходные данные задачи из пункта управления k ;
2. Каждый робот $r_i \in R$ определяет или получает по каналам связи информацию о текущем состоянии всех агентов роя, попадающих в зону видимости L ;
3. На основании полученных данных робот r_i определяет необходимое состояние S_i , в котором функция Y_k принимает минимальное значение;
4. Агент r_i определяет действие a_i , направленное на изменение состояния, текущего к новому;
5. После совершения действия, агент возвращается к пункту 2;

Для обеспечения корректного исследования территории необходимо реализовать задачу распределения роя роботов на позиции, где соблюдалась бы наиболее оптимальная дистанция между агентами, а именно перекрытие зон видимости датчиков, при этом не создавая помех в движении. Допустим между двумя агентами R_i и R_j , в начальный момент времени, расстояние — d , при этом минимально допустимое расстояние — z , L — зона видимости каждого робота. Тогда при выполнении условия $z < d < L$, вектор силы $F_{ij}(k)$, определяющий требуемое действие a_i , будет направлен на робота R_j и прямо пропорционален дистанции d между ними:

$$|\vec{F}_{ij}(k)| \sim d, z < d < L \tag{1}$$

Таким образом реализуется перемещения агентов для решения задачи позиционирования (барражирования).

Учитывая входные данные исследования, а именно работу в условиях недетерминированной среды и в условиях возможного организованного противодействия, необходимо учитывать сложности при организации обмена данными. В описываемой ситуации может возникнуть проблема не информированности некоторых агентов роя о конечной цели или направлении движения. Тем самым метод позиционирования роя играет огромную роль в решении задач патрулирования и исследования территории, а также при обеспечении направления движения агентов к конечной точки [5].

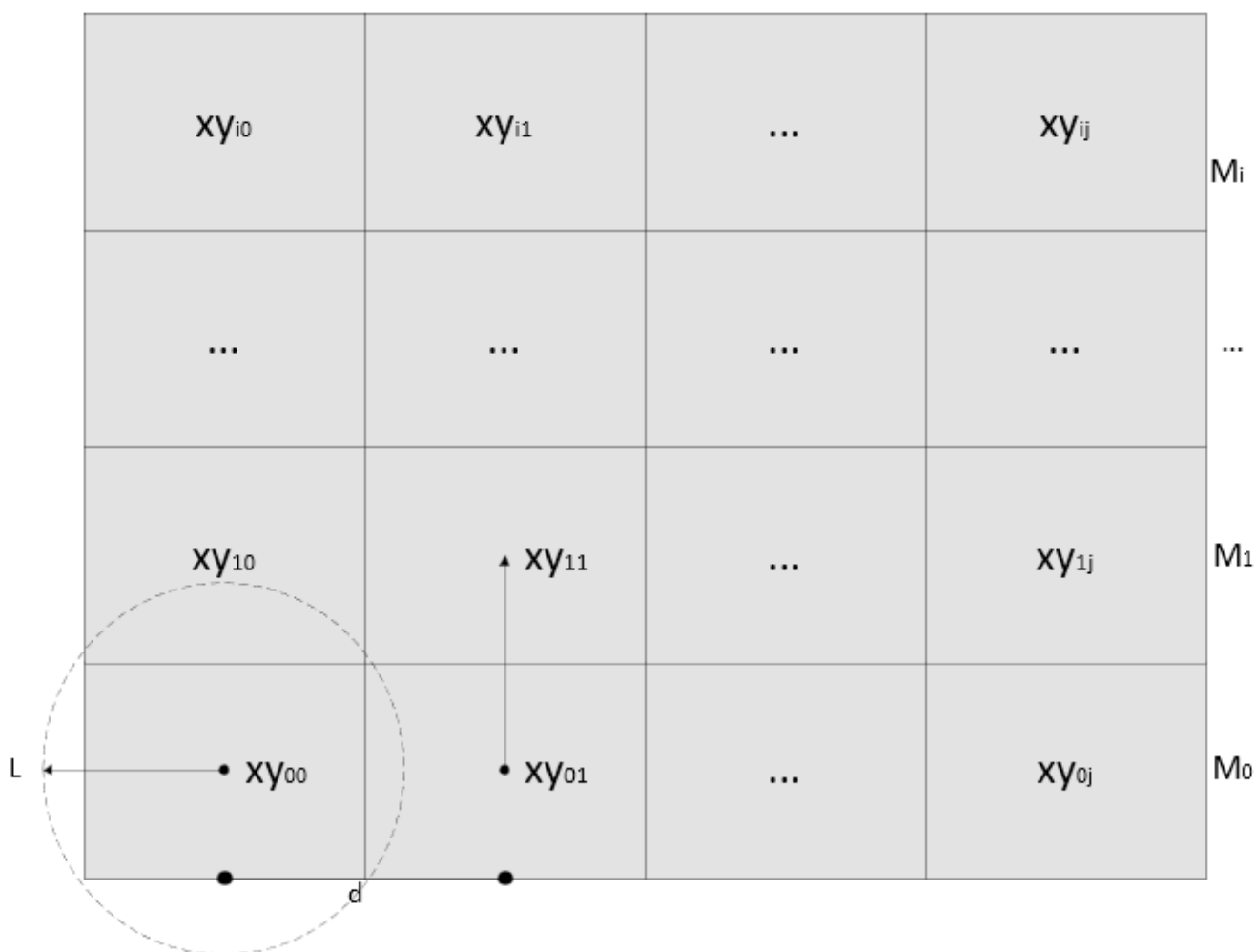


Рис. 1. Представление карты территории

3. Механизмы координации в условиях помех

Для формирования строя рою необходимо получить входные данные о начальных точках территории и ее протяженности. Вектор M , отвечающий за данные о территории, будет разложен на квадраты в соответствии с расстоянием оптимальной работы датчиков L , отвечающих за сбор данных с окружающей среды. Тогда точки необходимые для прохождения агентом являются центрами полученных квадратов. В случае нарушения процесса обмена данными, после процесса барражирования, агенты смогут двигаться согласно вектору направленности $(x_{ij}, x_{i+1 j+1}) \in \vec{n}$, рисунок 1.

Ведомые агенты будут двигаться по прежним правилам, за счет корректировки дистанции между роботами, попадающими в зону видимости, иными словами, за счет «притягивания» и «отталкивания». В случае от-

сутствия связи между агентами, исходя из алгоритма пересчета членов роя, каждый БЛА может начать изучать свой квадрат, соответствующий номеру члена. В случае потери агентов и получения новой задачи от КП после выхода из зоны помех, рой самоорганизуется и реализует алгоритм пересчета агентов.

Допуская, что рой знает количество своих агентов, и, учитывая, что группа работает в экстремальных условиях, соответственно допустимы потери среди БЛА, необходимо назначить время актуальности каждой точки для того, чтобы рой не ожидал вышедших из строя. Также должна осуществляться проверка на предмет нахождения в точке сбора всех агентов роя. Инициировать такую проверку в автономном режиме может самый младший по номеру агент: с тактом в T секунд начать опрос N соседних агентов. Для инициации необходимо осуществить проверку на поиск младшего в рое по следующему алгоритму:

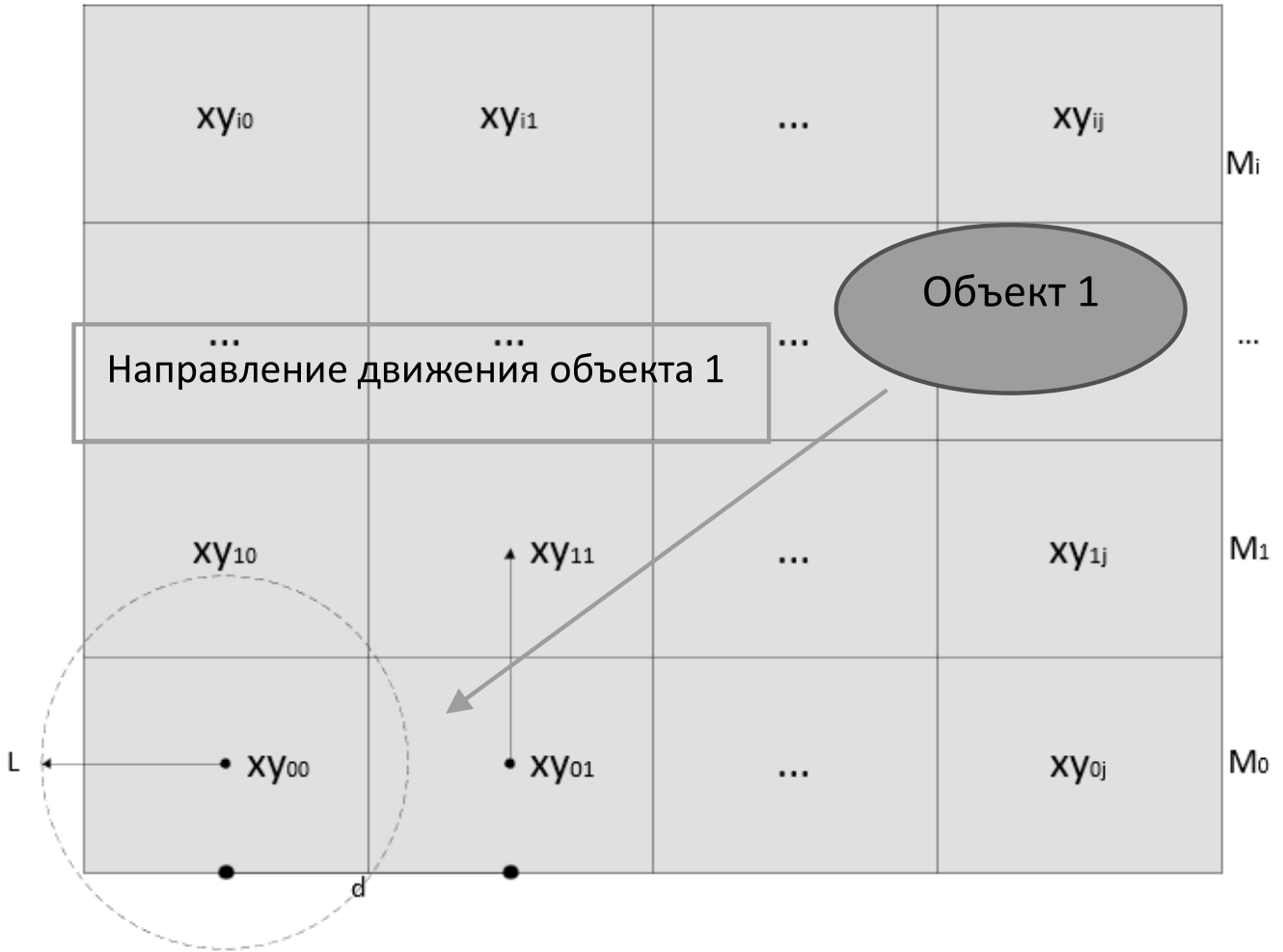


Рис. 2. Представление карты территории с динамическим объектом

- ◆ Начать проверку может любой из участников РИ осуществляя коммуникацию с одним из агентов R находящимися в пределах Q , формула (2).

$$R r_i (i=1, 2, \dots, N) \in Q \quad (2)$$

- ◆ Данными для передачи является номер агента и директива на переключку. Получивший такой пакет данных агент должен осуществить проверку своего номера с полученным и осуществить передачу данных одному из агентов, которые еще не знает о процедуре переключки и подходит под условие (2).
- ◆ В случае если агенту некого опросить, так как все члены РИ подходящие под условие формулы (4) уже знают о директиве и прошли опрос, агент передает всем членам РИ пакет данных с результатами переключки.
- ◆ Переключка будет окончена, когда результаты дойдут до агента, начавшего её.

Таким образом осуществится самоорганизация РИ: зная младшего построить модель решения какой-либо задачи не составит труда. Более того, осуществляется подсчет всех активных элементов системы для дальнейшего планирования решения подзадач.

Помимо опроса с целью самоорганизации, также можно выделить этап с проверкой данных, хранящихся у БЛА, чтобы сделать вывод о том, в каком моменте вышел из строя один из агентов. Если у одного из агентов хранятся данные о наличии или отсутствии объектов интереса в квадрате не его ответственности, а член РИ сохранивший эти данные в распределенной БД так и не появился в точке сбора, значит передавший данные агент вышел из строя на обратном пути к пункту сбора. Если данные отсутствуют у всех членов роя, то агент вышел из строя в своём квадрате ответственности и там присутствует угроза для всего роя. Учитывая эти данные, а также входные данные от КП о степени приоритетности каждого участка изучаемой террито-

рии, если такова присутствует, РИ может сделать вывод о необходимости дополнительной разведки.

При движении после этапа позиционирования, непосредственно по территории исследуемой местности, согласно карте точек М, «вырывающиеся» вперед агенты будут обладать информацией о конечной цели и смогут частично регулировать свое движение вектором требуемого движения. В то время как агенты, не обладающие необходимой информацией, будут следовать за ведущими с учетом дистанции. Таким образом моделируется ситуация, когда осуществляется частичное радиоэлектронное противодействие, влияющее на связь между некоторыми агентами роя, а также на дальность связи с КП, куда отправляются полученные в результате исследования данные. Более того, приближая ситуацию к реальной и введя динамические объекты поиска на исследуемой территории, информация о нахождении таких объектов может быть не получена или наоборот система будет дезинформирована появлением объекта в разных участках исследуемого квадрата в различное время.

В результате таких входных условий, информация о всех объектах должна быть проанализирована на предмет совпадения положений в разные участки времени на участке возможной траектории классифицированных объектов. Обеспечить такой комплексный подход возможно с помощью распределенной системой технического зрения [6]. Получение телеметрических данных, таких как скорость и положение возможно с помощью данных расстояния до объекта и получения кадров с заранее известным промежутком между ними, а также координат агента, осуществившего обнаружение. Учитывая смещение объекта на кадре, и дальность до объекта, а также допуская погрешность, выражение скорости можно записать по формуле (3)

$$U = \frac{|\vec{p}_1 \vec{p}_2| \left(H \tan \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right)^2}{t_2 - t_1} + \Delta_{И} \quad (3)$$

Где p_1 и p_2 — точки объекта в момент времени t_1 и t_2 соответственно, H — расстояния от агента до поверхности по которой движется объект, α — угол обзора устройства наблюдения, h — разрешение кадра, $\Delta_{И}$ — ошибка измерения, появляющаяся в следствии рельефа местности. Данные о направлении в свою очередь можно получить с помощью GPS навигации или с помощью ИНС, проанализировав результирующий вектор направления между p_1 и p_2 .

Телеметрические данные необходимо передать соседним агентам в чьем направлении движется объект, не передавая их по цепочки всем, таким образом вероятность спутать объекты, появившиеся через до-

статочный промежуток времени t , и по классификации принадлежащих одному классу, будет крайне мала. Агент же, получивший данные об объекте, двигающемся в его направлении должен ожидать его появление, пока сам не сменит позицию. Иными словами, каждый агент, в чьей зоне видимости появлялись объекты, обнаруженные другими членами роя, должен хранить данные о всех таких объектах: класс объекта, его координаты, скорость, вектор направления, и время обнаружения. Эти данные позволяют при обнаружении нового объекта любым из агентов, проверить его на возможные совпадения из БД. Действуя по следующему алгоритму:

1. Обнаружение объекта;
2. Классификация объекта;
3. Поиск объектов соответствующего класса;
4. Прогнозирование положения объектов;
5. Проверка, может ли находится объект соответствующего класса, обнаруженный ранее, на месте обнаруженного объекта сейчас. Если да, то обновить данные в БД, если нет записать как новый объект.

Таким образом, информация о территории будет храниться в виде текстовой информации, занимать на носителях мало места, и быстро передаваться от агента к агенту, ввиду своего объема.

Важно уточнить, что агент на протяжении всего времени наблюдения обнаруженного объекта должен обновлять информацию о нем таким образом, что при последней итерации записи, данные об объекте (направление, скорость, координаты) были получены при анализе кадра, после которого объект выходит за пределы зоны наблюдения, т.е. более не наблюдаем устройством, конкретного агента. В то же время, при наблюдении двух и более объектов одного класса одним агентом, должен осуществляться трекинг: последовательное отслеживание перемещения каждого из объектов и присваивание им порядкового номера, отличного от тех что уже записаны в БД.

Для формирования полного пакета данных и анализа в условиях ограниченности дальности связи с КП, а также между агентами, необходим алгоритм действий агента, описывающий поведение в условиях помех. При формировании критериев выполнения задания на исследования территории необходимо назначить точки встречи, которыми могут являться крайние точки квадрата территории подверженной разведке. В точки встречи агент может вернуться в следующих ситуациях:

- ◆ Подзадача агента выполнена и отсутствует связь с КП;
- ◆ Агент не может связаться с членами роя;
- ◆ Повреждение устройства наблюдения.

Заключение и выводы

Метод пунктов сбора ассимилирован с подхода кооперации военизированных подразделений в задачах разведки. Как и в уже существующем подходе, РИ определяет несколько пунктов сбора как пространственную область S , где точка момента утери связи с КП является наиболее близкой точкой к траектории движения, а центр области находится ниже по отношению к вектору движения. Алгоритм пересчета может быть разным в зависимости от задач, стоящих перед системой, но его целью должна являться ревизия агентов для дальнейшего дробления задачи РИ на подзадачи стоящие перед членами системы.

Информационная кооперация между БЛА позволяет увеличить достоверность данных, полученных в автономном режиме и более качественно анализировать динамические объекты.

Теоретическая выкладка не является основанием для внедрения такого механизма, и для дальнейшего изучения поведения РИ с использованием дополнительных механизмов автономной работы необходима экспериментальная база.

Благодарность

Благодарность Работа выполнена в организации ФГБОУ ВО БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (доп. соглашение от 09.06.2020 № 075–03–2020–045/2 на выполнение базовой части государственного задания «Разработка фундаментальных основ создания и управления группировками высокоскоростных беспилотных аппаратов космического и воздушного базирования и группами робототехнических комплексов наземного базирования»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Донат Яковлевич, «Использование принципов роевого интеллекта для управления целенаправленным поведением массово-применяемых микророботов в экстремальных условиях». Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011 г. Стр. 70–77.
2. Мариненков Е.Д., Виксин И.И., Жукова Ю.А., Усова М.А. «Анализ защищенности информационного взаимодействия группы беспилотных летательных аппаратов». Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. № 5. С. 817–825
3. «Передачики помех современным средствам связи»: учебная литература / А.Н. Зикий, А.В. Помазанов — Южный Федеральный Университет — Ростов-на-Дону; Таганрог: Издательство Южного Федерального Университета, 2020. — 176 с. ISBN978–5–9275–3653–5
4. Лопота В.А., Юревич Е.И. Экстремальная робототехника и мехатроника. Принципы и перспективы развития // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 4. С. 37–42
5. Нечаев В.В., Миняйло Д.В. «Некоторые аспекты группового управления многокомпонентными системными объектами на основе биоинспирированных алгоритмов». International Journal of Open Information Technologies. 2019. № 6. С. 94–100
6. Казанский Н.Л., Попов С.Б. «Распределенная система технического зрения регистрации железнодорожных составов». Журнал «Компьютерная оптика». 2012. С. 419–426.