

УДК 004.046: 303.717

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОНОМНОГО ПРЕОДОЛЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ РОЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЯ ЭХОЛОКАЦИИ

Гуров Виктор Александрович, магистрант, направление подготовки 27.04.03 Системный анализ и управление, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: vg101522@gmail.com

Научный руководитель: **Трипкож Владимир Алоисович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления и информатики в технических системах, Оренбургский государственный университет, Оренбург
e-mail: va.tripkosh@bk.ru

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию ранее синтезированного алгоритма автономного преодоления препятствий роем беспилотных летательных аппаратов на основе явления эхолокации методом имитационного моделирования. В симуляторе *CoppeliaSim* разработана имитационная модель, воспроизводящая функционирование роя квадрокоптеров в ходе поисково-спасательных работ в лесном массиве. Результаты компьютерного эксперимента с имитационной моделью свидетельствуют о том, что исследуемый алгоритм, по сравнению с существующими алгоритмами планирования пути в среде с препятствиями на основе графов, обеспечивает повышенную безопасность и живучесть роя дронов в условиях неопределенности и неполной информации об окружающей среде.

Ключевые слова: рой дронов, алгоритм управления, имитационное моделирование, компьютерный эксперимент, обход препятствий, эхолокация.

Для цитирования: Гуров В. А. Исследование алгоритма автономного преодоления препятствий роем беспилотных летательных аппаратов на основе явления эхолокации // Шаг в науку. – 2025. – № 3. – С. 39–44.

RESEARCH OF THE ALGORITHM FOR AUTONOMOUS OBSTACLE AVOIDANCE BY A SWARM OF UNMANNED AERIAL VEHICLES BASED ON THE PHENOMENON OF ECHOLOCATION

Gurov Viktor Aleksandrovich, postgraduate student, training program 27.04.03 System Analysis and Control, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: vg101522@gmail.com

Research advisor: **Tripkosh Vladimir Aloisovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Control and Informatics in Technical Systems, Orenburg State University, Orenburg
e-mail: va.tripkosh@bk.ru

Abstract. This paper is devoted to the study of a previously synthesized algorithm for autonomous obstacle avoidance by a swarm of unmanned aerial vehicles based on the phenomenon of echolocation by simulation modeling. A simulation model has been developed in the *CoppeliaSim* simulator that reproduces the functioning of a swarm of quadrocopters during search and rescue operations in a forest area. The results of the computer experiment indicate that the algorithm under study, in comparison with existing algorithms for path planning in a graph-based environment with obstacles, provides increased safety and survivability of a drone swarm in conditions of uncertainty and incomplete information about the environment.

Key words: swarm of drones, control algorithm, simulation modeling, computer experiment, obstacle avoidance, echolocation.

Cite as: Gurov, V. A. (2025) [Research of the algorithm for autonomous obstacle avoidance by a swarm of unmanned aerial vehicles based on the phenomenon of echolocation]. *Shag v nauku* [Step into science]. Vol. 3, pp. 39–44.

Успехи, достигнутые в разработке беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) как военного, так и гражданского назначения, создают хорошие предпосылки для широкого круга их применения, в частности для исследования земной поверхности, в том числе зон стихийных бедствий, мест чрезвычайных ситуаций, для обнаружения очагов пожаров, для измерения метеорологических данных, радиационного фона и других факторов, а также для обеспечения телекоммуникаций, мониторинга трубопроводов и линий электропередач, патрулирования границ [6]. Для повышения эффективности применения беспилотных летательных аппаратов их все чаще объединяют в группу, называемую роем [5].

В настоящее время проблема распознавания и преодоления препятствий является актуальной для множества мобильных платформ, при этом решение данной проблемы является ключом к созданию алгоритмов анализа текущей ситуации, маршрутизации и навигации мобильных роботов в пространстве без участия человека [7].

Целью исследования является повышение безопасности и живучести роя беспилотных летательных аппаратов за счет внедрения алгоритма автономного преодоления препятствий на основе явления эхолокации.

Данная статья посвящена экспериментальному исследованию ранее синтезированного алгоритма автономного преодоления препятствий роем БПЛА мультироторного типа при перемещении к заранее заданным целевым точкам на основе явления эхолокации. Блок-схема и подробное пошаговое описание работы алгоритма представлены в работе [4], поэтому в настоящем исследовании ограничимся лишь кратким описанием его особенностей. В соответствии с данным алгоритмом автономное преодоление препятствий осуществляется за счет применения системы автоматического регулирования положения БПЛА в трехмерном пространстве по отклонению.

Основными элементами контура управления с обратной связью являются ПИД-регулятор и ультразвуковой дальномер. Установленным значением регулятора является желаемое расстояние между дроном и препятствием. Ошибка регулирования представляет собой разницу между установленным значением регулятора и действительным расстоянием до препятствия, вычисленным ультразвуковым дальномером в режиме реального времени. Ультразвуковой дальномер излучает высокочастотную звуковую волну, которая отражается от ближайшего к дрону препятствия и возвращается на приемник датчика. Измерив интервал времени между отправлением ультразвукового сигнала и получением отраженного эхосигнала, датчик вычисляет текущее расстояние до препятствия с учетом известной скорости звука.

Управление квадрокоптером осуществляется подачей управляющих напряжений с аккумулятора на электродвигатели, которые приводят в движение воздушные винты (пропеллеры) [1]. В исследуемом алгоритме при приближении квадрокоптера к препятствию ближе установленного значения ПИД-регулятор автоматически подает управляющие напряжения на двигатели таким образом, чтобы квадрокоптер отклонился от препятствия в противоположную сторону.

Исследование алгоритма выполнялось методом имитационного моделирования. Имитационное моделирование представляет собой процесс воспроизведения при помощи компьютерной техники наиболее существенных, ключевых функций, сторон и характеристик настоящего объекта, процесса, явления или системы с целью предсказать их будущее поведение и получить наглядное представление о том, как они могли бы функционировать в действительности.

Важно отметить, что имитационное моделирование сложных технических систем на ЭВМ тесно связано с применением метода проб и ошибок, так как неудачный компьютерный эксперимент не приводит к каким-либо последствиям или аварийным ситуациям, а лишь указывает исследователю на ошибки в модели, которые требуют корректировки. Корректируя параметры модели, исследователь повторяет компьютерный эксперимент до тех пор, пока не будет достигнуто оптимальное функционирование изучаемого объекта.

В качестве программной среды имитационного моделирования был выбран симулятор робототехники CoppeliaSim, являющийся одним из лучших решений для быстрой разработки алгоритмов, моделирования автоматизации производства, удаленного мониторинга, быстрого прототипирования и верификации робототехники [2].

Имитационные модели, разрабатываемые в симуляторе CoppeliaSim, представляют собой интеграцию графической и программной составляющих. Графическая часть имитационной модели состоит из множества разнообразных статичных трехмерных моделей, позволяющих наглядно представить и воссоздать на компьютере исследуемый процесс или объект, а также поместить его в нужные исследователю условия функционирования. Программная часть имитационной модели приводит статичную трехмерную графику в движение, имитируя динамическое функционирование исследуемых робототехнических систем с высокой степенью достоверности.

На рисунке 1 представлена графическая часть разработанной имитационной модели, в рамках которой рой квадрокоптеров самостоятельно пересекает лесной массив, стремясь к заданным координатам и отклоняясь от обнаруженных препятствий.

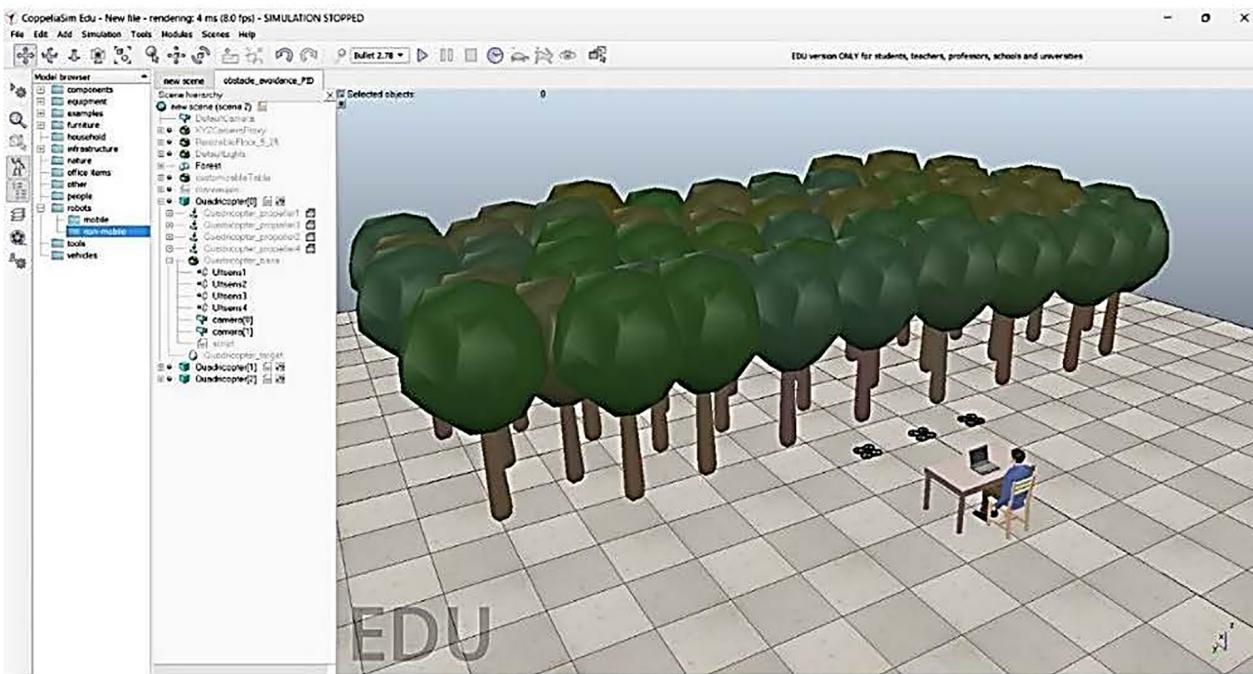


Рисунок 1. Графическая часть разработанной имитационной модели

Источник: разработано автором

В рамках разработанной имитационной модели на каждом квадрокоптере в качестве полезной нагрузки установлено четыре ультразвуковых датчика, измеряющих расстояние до остальных объектов на сцене в определенном радиусе действия. Радиус действия

каждого ультразвукового датчика в имитационной модели обозначен полупрозрачной конусообразной областью, исходящей из квадрокоптера. На рисунке 2 представлены оптимальные параметры ультразвуковых датчиков, подобранные методом проб и ошибок.

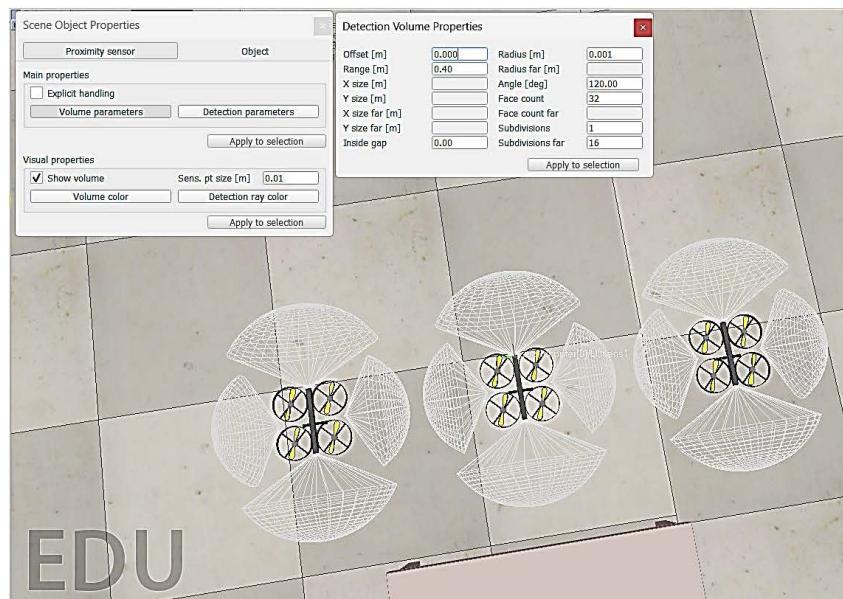


Рисунок 2. Настройка параметров ультразвуковых дальномеров

Источник: разработано автором

Другой важной составляющей полезной нагрузки квадрокоптеров являются камеры, фиксирующие окружающую обстановку. Видеоданные, собранные камерами, могут выводиться на экран оператора наземного пункта управления в реальном времени с использованием соответствующих сетевых технологий либо сохраняться на внешний носитель информации с возможностью их последующего извлечения и ис-

следования по окончанию полетного задания.

На рисунке 3 представлена программная часть разработанной имитационной модели. Программная реализация исследуемого алгоритма управления представляет собой последовательность команд, написанную на сценарном высокогоревневом языке программирования Lua.

```

1 function sysCall_init()
2     usensors1 = sim.getObjectHandle("Ultsens1")
3     usensors2 = sim.getObjectHandle("Ultsens2")
4     usensors3 = sim.getObjectHandle("Ultsens3")
5     usensors4 = sim.getObjectHandle("Ultsens4")
6     pidParams = {
7         p = 1.6,
8         i = 0.015,
9         d = 0.25
10    }
11    pidStates = {
12        errorSum1 = 0,
13        lastError1 = 0,
14        errorSum2 = 0,
15        lastError2 = 0,
16        errorSum3 = 0,
17        lastError3 = 0,
18        errorSum4 = 0,
19        lastError4 = 0,
20    }
21    desiredDistance = 0.4
22    obstacleAvoidanceWeight = 0.1
23    goalSeekingWeight = 1 - obstacleAvoidanceWeight
24 end
25 function sysCall_actuation()
26     res1,dist1=sim.readProximitySensor(usensors1)
27     res2,dist2=sim.readProximitySensor(usensors2)
28     res3,dist3=sim.readProximitySensor(usensors3)
29     res4,dist4=sim.readProximitySensor(usensors4)
30     local avoidanceVelocity = {0, 0}
31     if res1 > 0 then
32         local error1 = dist1 - desiredDistance
33         local pidOutput1 = calculatePID(error1, pidStates.errorSum1, pidStates.lastError1, pidParams)
34         avoidanceVelocity[1] = avoidanceVelocity[1] + pidOutput1
35         avoidanceVelocity[2] = avoidanceVelocity[2] + pidOutput1 * 2
36         pidStates.errorSum1 = pidStates.errorSum1 + error1
37         pidStates.lastError1 = error1
38     else
39         pidStates.errorSum1 = 0
40         pidStates.lastError1 = 0
41     end

```

Рисунок 3. Часть программного кода разработанной имитационной модели

Источник: разработано автором

Необходимо подчеркнуть, что разработанный скрипт не является полноценной управляющей программой для настоящего полетного контроллера БПЛА. Он лишь приводит в движение трехмерные компьютерные модели, которые исследователь предварительно разместил на сцене симулятора. Результатом такого движения является воспроизведение коллективного выполнения поставленной задачи роем

беспилотных авиационных систем в соответствии с заданным алгоритмом управления.

В исследуемом алгоритме эффект преодоления препятствий является результатом одновременного выполнения дронами двух задач. Первая задача предполагает автономное перемещение каждого БПЛА к своей целевой точке с заранее заданными координатами по кратчайшему пути независимо от текущего

положения. Вторая задача предполагает автономное отклонение каждого БПЛА в противоположную сторону от препятствия, обнаруженного ультразвуковым датчиком. Таким образом, квадрокоптеры отклоняются от обнаруженных препятствий и в то же время продолжают перемещение к целевым точкам, за счет чего создается эффект преодоления препятствий.

Для реализации такого подхода к управлению БПЛА требуется расстановка приоритетов между указанными задачами в управляющей программе полетного контроллера, причем более высокий приоритет необходимо присвоить перемещению дрона к целевой точке, а отклонение от препятствий следует выполнять по остаточному принципу. Программная часть разработанной имитационной модели воспроизводит именно такой подход.

В ходе компьютерного эксперимента было установлено, что присвоение более высокого приоритета задаче отклонения от препятствий может привести к тому, что квадрокоптер остановится около обнаруженного препятствия на установленном регулятором расстоянии, но не сможет продолжать перемещение к заданной точке. В работе [3] авторы называют по-

добную ситуацию проблемой локальных минимумов и рассматривают способы ее решения.

Согласно ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения», безопасность представляет собой свойство объекта при изготовлении и эксплуатации в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды. Под живучестью понимают свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации.

Исследуемый алгоритм управления предполагает функционирование роя БПЛА в условиях неопределенности и неполной информации о среде функционирования, поэтому всевозможные препятствия, возникающие на пути дронов в процессе выполнения полетного задания, вполне допустимо квалифицировать как воздействия, не предусмотренные условиями эксплуатации. Важно отметить, что возникновение каких-либо препятствий на пути беспилотных летательных аппаратов является нарушением их работоспособного состояния и создает угрозу как для жизни и здоровья людей, так и для окружающей среды.

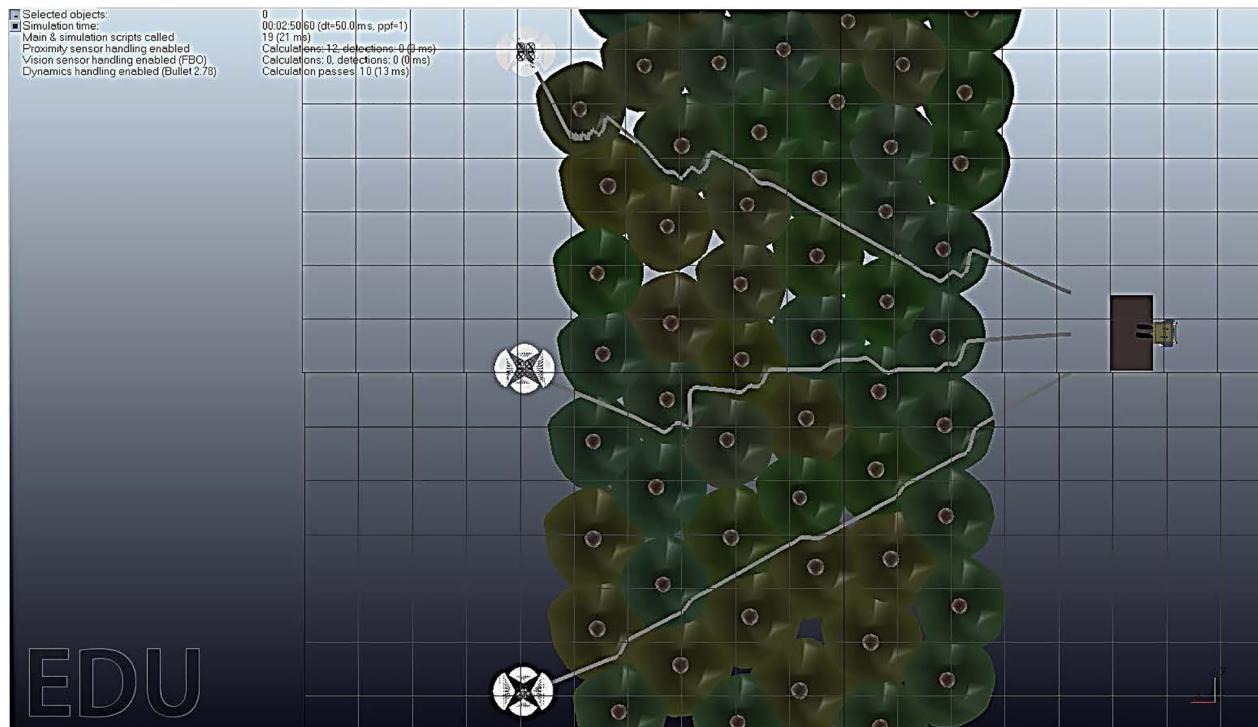


Рисунок 4. Результаты имитационного моделирования

Источник: разработано автором

Опираясь на результаты имитационного моделирования, представленные на рисунке 4, можно сделать

вывод, что исследуемый алгоритм автономного преодоления препятствий на основе явления эхолокации,

по сравнению с классическими методами и алгоритмами на основе графов и опорных (путевых) точек, обеспечивает повышенную безопасность и живучесть роя БПЛА как в детерминированных условиях функционирования, так и в условиях неопределенности и динамичности окружающей среды.

Рекомендуемым направлением будущих исследований является совершенствование рассматриваемого алгоритма для обеспечения возможности

установки текущих координат дрона-лидера, постоянно изменяющихся в режиме реального времени, в качестве целевых координат для остальных дронов в составе роя. Такой подход избавит оператора от необходимости постоянной ручной установки целевых координат для каждого дрона в отдельности, при этом управление одним дроном-лидером будет означать управление всем роем.

Литература

1. Лысухо Г. В., Масленников А. Л. Квадрокоптер: динамика и управление // Политехнический молодежный журнал. – 2020. – № 5(46). – С. 1. – <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2020-5-604>.
2. Пикалев Я. С. Анализ существующих симуляторов робототехнических систем // Проблемы искусственного интеллекта. – 2017. – № 1(4). – С. 51–65.
3. Пшихопов В. Х., Али А. С. Обход локальных минимумов функции ошибки при движении робота в неопределенной среде // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 6(164). – С. 26–31.
4. Трипкош В. А., Гуров В. А. Синтез алгоритма автономного преодоления препятствий роем беспилотных летательных аппаратов на основе явления эхолокации // Научно-технический вестник Поволжья. – 2025. – № 4. – С. 213–216.
5. Чекалина Е. А., Дмитренко М. Е., Попов А. И. Управление роем беспилотных летательных аппаратов в тактическом звене управления // Технологии. Инновации. Связь: Сборник материалов научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 19 апреля 2021 года. – 2022. – С. 181–185.
6. Чжу Ю. Формирование управления полетом группы беспилотных летательных аппаратов на основе алгоритма многоагентной модели роения // Информатика, телекоммуникации и управление. – 2022. – Т. 15, № 4. – С. 22–36. – <https://doi.org/10.18721/JCSTCS.15402>.
7. Шишкин Г. Г., Кобелев М. С. Программная часть системы уклонения от препятствий для беспилотного летательного аппарата // Форум молодых ученых. – 2019. – № 1–3(29). – С. 958–965.

Статья поступила в редакцию: 13.05.2025; принята в печать: 02.07.2025.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.