

АНАЛИЗ МЕТОДОВ СВЯЗИ И УПРАВЛЕНИЯ РОЕМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Прокофьев М.А., старший оператор 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА».

Поляков Р.Г., оператор 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА».

???, оператор 4 научной роты ФГАУ «Военный инновационный технополис «ЭРА».

Аннотация

В данной статье представлены результаты анализа существующих методов обеспечения связи и управлением роем беспилотных летательных аппаратов. Проведен обзор текущего положения дел в области роевого управления, выявлены проблемные вопросы, достоинства и недостатки используемых подходов. Рассмотрена перспективная гибридная архитектура для обеспечения эффективного управления роем БПЛА на базе сетей сотовой связи.

Ключевые слова: военный инновационный технополис «ЭРА», беспилотные летательные аппараты, рой, автономные системы, беспроводная связь

Введение

Малые беспилотные летательные аппараты (*sUAV*) стали привлекательным транспортным средством для решения множества задач. Их способность доставлять в небо необходимые инструменты для коммунальных, разведывательных, коммерческих и других целей без пилота-человека на борту неопределима. При использовании пилотируемого воздушного судна существует риск получения травмы или смерти пилота в случае возникновения критической ошибки в полете. С беспилотным летательным аппаратом эти опасения нивелируются. Управляемая авиация дорогая, цена на покупку или аренду воздушного судна общего назначения непомерно высока. Труд пилотов, расходы на топливо и техническое обслуживание летательных аппаратов требует наличие больших бюджетов и возлагает на предприятия значительные расходы при использовании самолетов общего назначения для широкого коммерческого и военного применения. По этим причинам, использование малых беспилотных летательных аппаратов является весьма привлекательной альтернативой.

В настоящее время БПЛА уже используются для широкого круга задач, таких как: фотографирование, кинематография, сельское хозяйство, осмотр линий электропередач и сооружений ^[1], наблюдение за объектами промышленности с точки зрения безопасности, геодезическая съемка, инфракрас-

ная и мультиспектральная съемка ^[2], поисково-спасательные операции. Однако их использование ограничивается, в основном, единичными экземплярами, управляемых с земли оператором. Для устранения таких ограничений активно развивается направление «роевого управления БПЛА», методы работы и связи которого описаны далее в рамках данной статьи.

1. Текущее состояние роевого управления

Понятие «роя» обычно определяется как группа поведенческих образований, которые вместе координируют действия для получения значительного или желаемого результата ^[3]. Существует несколько естественных примеров роящегося поведения в природе. Пчелы координируют друг с другом выполнение задач, имеющих решающее значение для выживания их роя. Стаи мигрирующих гусей координируют эффективные модели полёта для достижения своей миграции. Аналогично, рой беспилотных летательных аппаратов является скоординированной единицей, состоящих из нескольких БПЛА, совместно выполняющих поставленную задачу или некоторый набор задач.

К преимуществам роя относят: экономию времени, затрачиваемого на выполнение задач, сокращение человеко-часов, за счет исключения операторов из схемы управления, что соответственно уменьшает трудозатраты, а также сокращение других сопутствующих операционных расходов. Одним из конкретных примеров коммерческого применения, которому принес бы пользу рой БПЛА, является наблюдение за нормированным индексом различий растительного покрова (*NDVI*). *NDVI* является одним из важнейших показателей в сельском хозяйстве. Для определения *NDVI* требуется осуществить пролет над сельскохозяйственными угодьями, в ходе которого камеры, оснащенные аппаратурой дистанционного зондирования, записывают снимки культур с высоким разрешением и геометрией. Снимки и аппаратура *NDVI* показывают, какие участки полей сельскохозяйственных культур находятся на правильной или неправильной стадии развития. Геодезическая съемка фермы с сотнями или тысячами песчаных гектаров занимает много времени и недостаточно эффективна при использовании современных методов. Использование координированной группы *sUAV*, осуществляющих съемки всего хозяйства с минимальным или нулевым вмешательством оператора позволило бы значительно повысить эффективность проведения сельскохозяйственных работ.

В коммерческой сфере одним из наиболее заметных применений БПЛА является доставка услуг и товаров. Американские компании *Amazon* и почтовая служба *United* относительно недавно проявили интерес к использованию БПЛА для доставки посылок. При использовании типичного подхода, использующего удаленного пилота и одного БПЛА доставка посылок была бы неэффективна. Затраты на такую доставку примерно бы равнялись стоимости

доставки обычным курьером. По этой причине для сокращения расходов и увеличения эффективности служб доставки применение роя беспилотных летательных аппаратов с возможностью согласованного управления и связи, было бы весьма элегантным и перспективным решением.

Исходя из вышеописанного, можно сделать вывод, что на данный момент роевое управление находится в «зачаточном состоянии» и, благодаря своим возможностям, имеет высокий шанс и перспективы на дальнейшее развитие.

2. Методика автономного управление роем БПЛА

Существуют различные уровни автономности для транспортных средств. Их характеристики зависят от количества задач, координации или принятия решений, которые транспортное средство может выполнить с помощью данных, полученных от оператора. На примере коммерческих и пассажирских транспортных средств было определено шесть уровней [4]. Эти шесть уровней варьируются от отсутствия автономности (полного контроля за процессом со стороны оператора) до полной автономности. Следуя данной классификации, можно определить, что самый высокий уровень определяется как способность БПЛА выполнять задачу, согласованную между несколькими БПЛА без вмешательства оператора.

Именно такой уровень автономности может быть достигнут роем БПЛА. Наиболее важным аспектом работы соответствующей автономной системы является цепочка принятия решений, которая происходит вместо работы человека. Движение и выполнение задач БПЛА с траловым управлением полностью контролируется решениями, принимаемыми человеком, тогда как в полностью автономной системе решения принимаются алгоритмами. В автономной СБП используется парадигма принятия решений, определяемая тремя этапами: получением данных, их обработкой и принятием решений о дальнейших действиях. Структура такой системы показана на рис. 1.

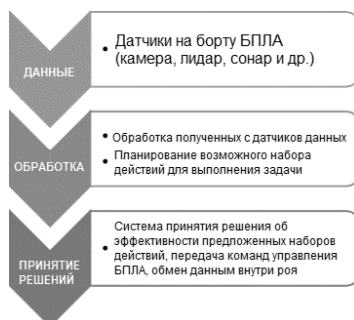


Рисунок 1. Структура автономной системы управления БПЛА.

Датчики являются средством аппаратного обеспечения информационной стадии парадигмы для роя БПЛА. Они получают необработанные данные, относящиеся к среде эксплуатации желаемой задачи, и передают данные на бортовой компьютер. Датчики, специфичные для среды обитания роя БПЛА, могут включать в себя: GPS/ГЛОНАСС, датчики скорости воздуха, акустические датчики, камеры и многие другие в зависимости от области применения.

Этап обработки состоит из двух подфаз: восприятие и планирование. Восприятие определяется как акт преобразования неоднозначных данных, полученных с датчиков, в полезную информацию. Планирование относится к процессу использования воспринимаемой информации для формулирования решения о выполнении задачи. Этапы восприятия и планирования являются ключевыми фазами, на которых строится разработка алгоритмов и, в конечном счете, реализуется автономность системы. В работе ^[5] авторами исследуются и предлагаются методы, использующие технологии, построенные на искусственном интеллекте, машинном обучении, формальной логике, экспертных системах и других методах распределенного интеллекта, чтобы в конечном итоге реализовать полную автономность в распределенных СПР, таких как рой БПЛА. И, наконец, этап процессинга - это выполнение принятых решений и завершение задачи. Рассмотрим далее подробнее проблемы подфаз восприятия и планирования на этапе обработки.

2.1. Анализ состояния и проблем подфазы восприятия

Важность алгоритмов в среде автономных транспортных средств нельзя недооценивать. Вместо человеческой работы управление роями БПЛА оставляется именно на усмотрение алгоритмов. Алгоритмы, управляющие работой роя, находятся на стадии управления парадигмой автономного принятия решений. Они являются неотъемлемой частью как стадии восприятия, так и стадии планирования на этапе управления. На этой стадии восприятия роль алгоритмов заключается в пролонгации данных, получаемых с датчиков, сообщающих о текущих параметрах системы. При обработке большого объема данных, поступающих от многих бортовых датчиков, возникают трудности. Алгоритмы на этой подфазе часто являются алгоритмами добычи или обработки данных, обеспечивающих фильтрацию и группировку больших объемов данных. Зарубежными учеными был предложен ^[6] специальный базовый алгоритм для обнаружения аномальных данных, получаемых с датчиков на борту БПЛА. Анализ основных показателей является хорошо известным методом наблюдения корреляций между потоками данных и уменьшением размерности данных. Несмотря на высокую эффективность предложенного алгоритма, его применение в реальности несколько проблематично, по причине попытки создания универсального алгоритма для решения любых задач. В

связи с этим, встает вопрос о необходимости провести больше исследований в этой области, в частности рассмотреть более конкретные случаи специфических применений БПЛА.

2.2. Анализ состояния и проблем подфазы планирования

На этом этапе алгоритмы получают на вход обработанные данные и превращают их в значимую информацию. Существует множество различных типов алгоритмов, которые были продемонстрированы для выполнения этой задачи для роя БПЛА, в ходе работы которых формулируется информация, необходимая для решения задач БПЛА.

В связи со сложностью систем беспилотных летательных аппаратов и их высокой специфичностью применения, возникает потребность в новых алгоритмах, которые могли бы быть развернуты для превращения «чистых» данных с датчиков в информацию, которая может быть использована на борту БПЛА. Некоторыми видами алгоритмов, решающих такие задачи являются формальная логика, машинное обучение или нейронная сеть, а также теория графов. Одним из примеров простых алгоритмов, который уже широко применяется системами управления полетом БПЛА для навигации, является фильтр Калмана. В том числе, на данный момент были предложены методы машинного обучения для обнаружения безопасных зон посадки при аварийной посадке. Все эти методы являются неотъемлемой частью дальнейшего развития технологий БПЛА.

Среда роя БПЛА создает специфические проблемы, поэтому требуется тщательный подбор и разработка алгоритмов для ее пригодности. В частности, автономное управление многими БПЛА по безопасной и эффективной схеме имеет первостепенное значение. Для алгоритмов управления роем предлагается ряд методов. Пожалуй, наиболее распространенный из них, основывается на вариациях и адаптациях оптимизации роя частиц. Несмотря на малое количество научных работ для этих методов, предлагается использовать методы линейного программирования для оптимизации траекторий, а также реализовать алгоритмы пчелиных колоний для оптимизированного планирования траекторий и координации между БПЛА ^{[7][8]}.

По результатам анализа научных статей, описывающих возможности вышеуказанных алгоритмов, было отмечено, что в некоторых из них действительно демонстрируется автономная работа роя БПЛА, однако при этом во многих исследованиях используются только имитационные среды, в отсутствии реального применения.

3. Методы обеспечения связи внутри роя БПЛА

Роевое управление, само по себе не является новой технологией. Существуют предложения по применению и разработке роя БПЛА, особенно для военных целей, еще с начала 1990-х. Несмотря на это, такие технологии все еще находятся в зачаточном состоянии. По мере их развития и становления они становятся все более доступными и все чаще крупными компаниями привлекаются значительные усилия по исследованию, разработке и интеграции БПЛА в более широкое и коммерческое применение. Одним из примеров такого применения является рой из 300 беспилотников, разработанных компаний *Intel*, развернутые для проведения скоординированного светового шоу для зимней Олимпиады 2018 года. В дополнение к этому, были и другие демонстрации роя беспилотных летательных аппаратов, однако в большинстве демонстраций уровень автономной работы был относительно низким.

В большинстве случаев каждый отдельный БПЛА управляется одновременно с помощью наземной станции (*GKS – Ground Control Station*). Традиционные рои БПЛА используют компьютер в качестве *GKS* с программным обеспечением наземного управления. Компьютеры оснащены приемопередатчиком, который посылает и принимает телеметрические данные от подключенных БПЛА. Традиционно, данные телеметрии включают в себя информацию со спутников *GPS*, скорость передвижения относительно земли и другие параметры, собранные с множества различных датчиков. Традиционно эти приемопередатчики используют нелицензируемые радиочастотные диапазоны, такие как 900 МГц, для передачи и приема данных.

Для достижения более высокого уровня автономности БПЛА решения по управлению должны приниматься с помощью бортовых компьютеров, обменивающихся между собой определенными наборами данных. Текущие демонстрации роя БПЛА используют одну из двух общих форм архитектуры связи роя: основанную на инфраструктурном подходе (*infrastructure*), и специальную одноранговую сетевую архитектуру (*ad-hoc*). Рассмотрим далее каждую из них.

3.1. Инфраструктурный подход к связи внутри роя

Инфраструктурная архитектура состоит из *GKS*, которая принимает телеметрическую информацию от всех беспилотных летательных аппаратов в рое и посылает команды обратно на каждый БПЛА по отдельности. В некоторых случаях *GKS* связывается в режиме реального времени с отдельными беспилотными летательными аппаратами, посылая команды контроллерам полета на борту каждого БПЛА. В других случаях каждому из них предварительно программным путем задается полетная программа, которая выполняется, в то время как *GKS* используется для наблюдения за системами. Рой БПЛА такого типа считаются полуавтономными, поскольку для выполнения

заданной операции им по-прежнему требуются команды от центрального диспетчерского пункта. Структура такой архитектуры показана на рис. 2.

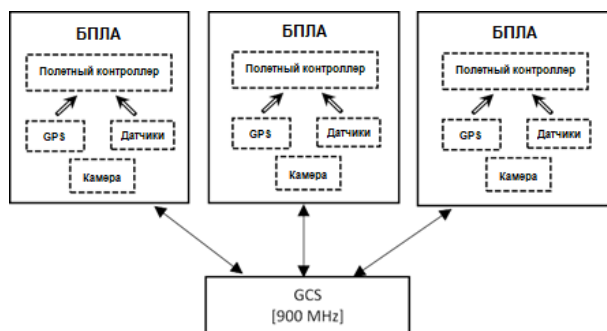


Рисунок 2. Структура архитектуры роя на основе инфраструктуры (GCS).

Инфраструктурная архитектура является наиболее распространенной для роев БПЛА [9]. Некоторые широко используемые и легкодоступные программы GCS содержат базовые инфраструктурные возможности роя, например ПО *Ardupilot*. Одним из преимуществ такого подхода является то, что оптимизация и вычисления могут проводиться в режиме реального времени с помощью GCS на более высокопроизводительном компьютере, который вряд ли можно было бы легко переносить с помощью БПЛА. Кроме того, нет необходимости объединять беспилотники в сеть, что приводит к снижению требуемого оборудования на их борту.

Инфраструктурный подход к управлению роем зависит от конкретной реализации GCS для координации всех беспилотных летательных аппаратов. Эта зависимость приводит к отсутствию резервирования системы. В случае атаки или сбоя в работе GCS нарушается работоспособность всего роя. Инфраструктурный подход требует, чтобы все БПЛА находились в зоне досягаемости сигнала с GCS. В том числе, немаловажным недостатком нелегальной радиочастотной связи является то, что она может быть восприимчивой к помехам. Из-за малой грузоподъемности *sUAV*, аппаратные средства, необходимые для обеспечения надежной связи с инфраструктурой, могут ограничивать полезность роев.

Кроме того, важным недостатком такого подхода является отсутствие возможности распределенного принятия решений. В инфраструктурном подходе GCS координирует принятие решений по всем БПЛА на основе вычислений и алгоритмов, заложенных в программу GCS, что довольно часто может приводить к неправильной оценки ситуации и принятию не самых эффективных решений.

3.2. Одноранговый (FANET) подход к связи внутри роя

Альтернативным подходом для координации связи между беспилотными летательными аппаратами внутри роя является использование архитектуры *FANET* (*Flying ad-hoc network*). Принцип её работы заключается в следующем: группа беспилотных летательных аппаратов, взаимодействуют друг с другом без точки доступа, но, по крайней мере, один из них должен быть подключен к наземной базе или спутнику. Таким образом, БПЛА выполняют свои задачи без помощи оператора, практически на автопилоте.

В последние годы многие научные и промышленные общества сосредоточились на развитии *FANET*, благодаря использованию в ней более дешевых и небольших по размеру устройств беспроводной связи. В настоящее время такая архитектура уже активно используется в различных областях, таких как военное и гражданское применение, борьба с лесными пожарами и мониторинг стихийных бедствий. Поскольку каждый тип сети имеет свои собственные спецификации, важно использовать надежный протокол, основанный на спецификациях, и проверять его производительность с помощью моделирования. На проведение процесса моделирования любого протокола влияют два фактора: первый - это его модель мобильности, а второй - схема коммуникационного трафика.

Беспроводная одноранговая сеть – это беспроводная сеть, которая не полагается на существующую инфраструктуру, чтобы организовать процесс обмена данными между устройствами. Для такой сети не нужны ни маршрутизаторы, ни точки доступа. Вместо этого узлы динамически назначаются и переназначаются на основе динамических алгоритмов маршрутизации. Например, в коммуникационных системах *M2M* были предложены различные конфигурации одноранговых сетей связи. В системе *FANET* все БПЛА являются частью сети связи, которая устанавливается между БПЛА. Эта сеть позволяет осуществлять связь в реальном времени между ними, как показано на рис. 3.

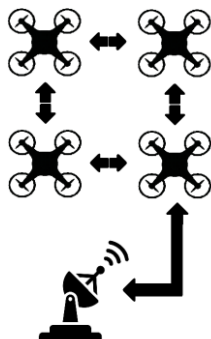


Рисунок 3. Архитектура связи роя БПЛА на основе *FANET*.

Прямая связь между БПЛА обеспечивает распределение процесса принятия решений, а также встроенное резервирование, поскольку весь рой не зависит от инфраструктуры для выполнения требуемой операции. Это является основным преимуществом *FANET*. Тем не менее и у такой системы есть свои недостатки, связанные с переносимым весом и мощностью: для создания *FANET* необходимо сетевое оборудование на борту каждого БПЛА, а расстояние, на котором БПЛА могут надежно общаться друг с другом через *FANET*, является ограничивающим фактором к ее осуществлению.

Кроме того, стоит отметить, что динамическая реконфигурация маршрутизации для программ, управляющих роем БПЛА является сложной вычислительной задачей, приводящей к потере сетевых пакетов. Для некоторых областей применения БПЛА, в которых точность телеметрии данных между ними критически важна, создание надежной сети *FANET* затруднено.

Для того, чтобы использовать сильные стороны, как инфраструктурной, так и одноранговой архитектур, одновременно смягчая их некоторые слабые стороны предлагается использовать гибридную архитектуру сети, использующей принципы сотовой беспроводной связи, но устанавливающей сетевой протокол между беспилотными летательными аппаратами без вмешательства *GKS*.

4. Перспективы гибридной архитектуры управления роем БПЛА

В качестве гибридного подхода предлагается использовать архитектуру, являющейся адаптацией одноранговой сети, реализованную посредством поддержки инфраструктурного подхода. В частности, возможности последнего дополняют возможности связи БПЛА-БПЛА, путем передачи телеметрии каждого из летательных аппаратов через сотовую мобильную инфраструктуру, как показано на рис. 4.

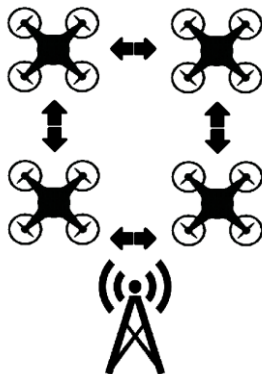


Рисунок 4. Гибридная архитектура роя БПЛА на основе сотовой связи.

В такой архитектуре процесс принятия решений распределяется между БПЛА, а сотовая инфраструктура используется исключительно для передачи данных. Высокий уровень автономности все еще может быть достигнут, несмотря на распределенный характер предложенной архитектуры, базирующейся на некоторой инфраструктуре. Для этого на каждом БПЛА должна быть развернуто оборудование с вычислительной мощностью, достаточной для координации решений, основанных на телеметрических данных, получаемых в реальном времени от всех подключенных к сети роя БПЛА. Это позволяет принимать распределенные решения, основанные на формальной логике, машинном обучении и других алгоритмах распределенного управления, рассмотренных ранее в рамках данной статьи.

Использование именно сотовых сетей аргументируется следующим образом: сотовая технология четвертого поколения (*4G*) может похвастаться максимальной скоростью загрузки 1 Гбит/с. Разрабатываемые в настоящее время системы связи *5G* могут похвастаться максимальной скоростью загрузки до 10 Гбит/с с задержкой до 1 мс. Типичный размер пакетов для связи с БПЛА составляет от 17 до 263 байт. В то время как для этих пакетов достаточно скорости *4G*, использование сетей *5G* позволит осуществлять дополнительный поток данных, включая типы данных, такие как видео с камер на борту БПЛА или данные из систем обнаружения препятствий или целей.

Кроме того, сети сотовой связи эффективны с точки зрения необходимого оборудования (его объемов и веса). *SIM*-карты или карты беспроводного доступа имеют малый вес (всего несколько грамм), и могут быть легко добавлены к компьютеру-компаньону или даже смартфону-компаньону, контролирующим рой БПЛА.

Исходя из вышеописанного, можно сделать следующие выводы: преимущества гибридной архитектуры для роевого управления БПЛА многочисленны и делают её весьма перспективной для дальнейших исследований и реализации в гражданской и военной сферах, по следующим причинам:

- диапазон, на котором беспилотные летательные аппараты могут общаться практически неограничен. Большая часть территории крупнейших стран мира, таких как Россия, США, Канада и другие имеет покрытие 3G или лучше сотовой связи с постоянно растущей скоростью.
- надежность и избыточность мобильных сетей для роя БПЛА вызывают меньше беспокойства, чем для традиционной инфраструктурной архитектуры роя БПЛА из-за присущей базовым станциям сотовой связи надежности. В то время как высокая степень автономности может быть достигнута за счет традиционных архитектур, резервирование, обеспечиваемое предлагаемой инфраструктурой, является выгодным по сравнению с традиционной.

Литература

1. **Jones, D.** Power line inspection-An UAV concept. The IEE Forum on Autonomous Systems, 2005, Ref. No. 2005/11271: pp. 8
2. **Vega, F.A., Ramírez, F.C., Saiz, M.P., and Rosúa, F.O.** Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sun-flower crop. Biosyst. Eng. 132: 19-27
3. **Jeffrey, M.C., Subramanian, S., Yan, C., Emer J., and Sanchez, D.** A scalable architecture for ordered parallelism. IEEE International Symposium on Microarchitecture (MICRO), 48th Annual IEEE/ACM. pp. 228–241.
4. **SAE International.** Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles.
5. **Plathottam S., and Ranganathan, P.** Next generation distributed and networked autonomous vehicles: Review. In Proceedings of International Conference on Communication Systems and Networks, COMSNETS 2018. pp. 577–582
6. **Yong, D., Yuanpeng, Z., Yaqing, X., Yu, P., and Datong, L.** Unmanned aerial vehicle sensor data anomaly detection using Kernel principal component analysis. IEEE International Conference on Electronic Measurement and Instruments 2017.
7. **Karaboga, D., and Basturk, B.** A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm. J. Glob. Optimiz. 39(3): 459–471.
8. **Karaboga, D., Gorkemli, B., Ozturk, C., and Karaboga, N.** A comprehensive survey: Artificial bee colony (ABC) algorithm and applications. Artif. Intell. Rev. 42(1): 21–57.
9. **Bekmezci, I., Sahingoz, O.K., and Temel, Ş.** Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey. Ad Hoc Networks, 11(3): 1254–1270.