

УДК 621.391

Альтернативная коммуникационная сеть и правило управления группой ее элементов с голономной моделью связей

С.И. ПОЛОВЕНЯ,
заведующий кафедрой ТКС,
канд. техн. наук, доцент

Ю.А. ДУЙНОВА,
преподаватель кафедры ТКС

Учреждение образования
«Белорусская государственная
академия связи»



Предложен подход к созданию альтернативной сети связи, модели взаимодействия беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в одной и нескольких смежных зонах. Указаны уровни архитектуры «интернета вещей» (IoT – Internet of Things) и их взаимосвязь с предлагаемой системой связи, отмечены функциональные особенности каждого уровня. Предложены автономная работа сети и работа во взаимодействии с существующими сетями связи. Описано правило управления группой БПЛА по скорости с голономной моделью связей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, телекоммуникационная сеть, мультиагентная система, децентрализованное управление.

Введение. Большинство существующих сетей передачи информации позволяют обеспечить качественную и высокоскоростную передачу сообщений на заданной территории.

Современные сети связи, такие как сети подвижной радиосвязи, спутниковые сети связи, широкополосные сети связи, пассивные оптические сети, имеют устоявшуюся организацию построения и базируются на сетевых протоколах, которые определяют правила и действия, позволяющие осуществлять соединение и обмен данными между двумя и более включенными в сеть узлами. Однако, несмотря на ряд неоспоримых преимуществ, они обладают некоторыми недостатками. Например, системы подвижной радиосвязи имеют фиксированное количество радиоканалов на каждую базовую станцию, что ограничивает емкость станции. Кроме того, на территории любого государства всегда существуют участки, не охваченные системами подвижной радиосвязи. Также качество услуг ухудшается на границе соты. Использование спутниковых систем связи существенно ограничивается сложностью их применения при ухудшении погодных условий. К недостаткам сетей связи также следует отнести стоимость строительства, выделения

и использования радиочастотного спектра, скорость развертывания сети, неустойчивость к стихийным бедствиям [1].

Следовательно, требуется организовать сеть связи, способную к быстрому развертыванию, адаптации к существующим сетям, с устойчивыми к изменению в пространстве под действием внешних факторов узлами сети. В статье предложен новый подход к построению самоорганизующейся динамической сети связи на основе БПЛА и правило управления группой для координации совместной работы. Многоуровневая архитектура проектируемой сети связи основывается на базовых уровнях «интернета вещей».

Постановка задачи. Опорой для построения альтернативной сети должны стать известные крупномасштабные структуры:

- сеть авиадиспетчерской службы;
- сеть подвижной радиосвязи;
- сеть интернет.

Такие структуры всегда содержат информацию о топологии сетей, сетевых адресах оборудования сети и другие необходимые для работы сети сведения. Каждый БПЛА является элементом сети,

способным выполнять функции базовой станции в случае автономности сети и функции приемо-передатчика информации в случае построения на базе существующих сетей.

Авиадиспетчерская служба включает в себя совокупность служб, часть которых можно использовать для построения и обслуживания альтернативной сети. Перечислим их: служба организации воздушного движения (ATM – Air Traffic Management), служба управления воздушным движением (ATC – Air Traffic Control), служба обслуживания воздушного движения (ATS – Air Traffic Service).

Служба управления воздушным движением позволяет эффективно использовать связь с воздушными судами и поддерживает услуги воздушной навигации. Основные принципы заключаются в разделении воздушного пространства на секторы, заключении соглашений о возможности двустороннего пересечения границ смежных секторов с соблюдением инструкций и обеспечением воздушной безопасности.

Воздушные суда летают по воздушным трассам, которые строятся из отрезков. Отрезки образуют сеть, опутывающую целые государства. В узлах этой сети (на концах отрезков) расположены VOR-радиостанции (VHF Omni Directional Radio Range). Передатчики и приемники VOR-станции излучают два сигнала в диапазоне 108,00–117,95 МГц. Один сигнал всенаправленный, другой описывает круг в 360° узким лучом (как луч маяка). В результате получается диаграмма излучения в виде 360 лучей (один луч через каждый градус окружности). Эти лучи называются VOR-радиалами (VOR Radials). VOR-оборудование на борту может определить, на каком из радиалов известной станции находится воздушное судно. Необходимость знания двух азимутов для определения своего положения требует использования значительного количества радиомаяков. Существует дальномерное оборудование DME (Distance Measuring Equipment), определяющее удаление от воздушного судна.

Если VOR- и DME-устройства расположить в одном месте, то DME воздушного судна может легко вычислить свое положение по азимуту и удалению от VOR.

Традиционно главной задачей авиадиспетчера было удержание утвержденного расстояния между воздушными судами с соблюдением заданного маршрута. Однако в рамках дальнейшей модернизации системы возникла потребность в большей автономии пилотов с самостоятельным контролем соблюдения интервала между судами, при которой вмешательство диспетчеров минимально. Это стало возможно благодаря технологии ADS-B (Automatic

Dependent Surveillance-Broadcast), внедряемой в настоящее время в разных странах. Она позволяет воздушному судну и диспетчерам на земле анализировать трафик движения воздушных судов с большей точностью и получать аэронавигационную информацию. Также ADS-B-устройства передают погодную информацию в реальном времени, что значительно повышает безопасность полетов. Доступ к ADS-B-информации бесплатен и свободен для всех.

Оборудованное ADS-B-трансивером воздушное судно передает всем свою точную позицию в течение всего пути вместе с другими данными, включая скорость, высоту, курс, взлет или снижение. Приемники ADS-B, интегрированные в системы контроля воздушного трафика или установленные на борту воздушного судна, обеспечивают пользователям точное отображение на экране движения воздушных судов как в небе, так и на земле.

Обладея более точной информацией о расположении судов в воздушном пространстве, диспетчер имеет возможность минимизировать задержки при отправлении и прибытии летательных аппаратов. Так как количество БПЛА может исчисляться тысячами, необходимо автономное разделение ограниченного воздушного пространства с минимальным участием диспетчера или без него, однако диспетчер должен иметь возможность экстренного прекращения работы каждого БПЛА в группе.

Для алгоритма позиционирования узлов альтернативной сети связи на основе БПЛА в режиме автономной работы наиболее удобной является традиционная сотовая концепция. Каждая из ячеек обслуживается своим передатчиком с невысокой выходной мощностью и ограниченным числом каналов связи. Это позволяет использовать повторно частоты каналов этого передатчика в другой, удаленной на значительное расстояние, ячейке. В соседних ячейках применяются различные частоты, т. к. зоны обслуживания сот могут перекрываться вследствие изменения условий распространения радиоволн. Группа сот с различными наборами частот называется кластером.

Базовые станции, на которых допускается повторное использование выделенного набора частот, удалены друг от друга на расстояние, называемое защитным интервалом. Именно возможность повторного применения одних и тех же частот определяет высокую эффективность использования частотного спектра в сотовых системах связи.

Интернет объединяет сети компьютеров, обеспечивая коммуникацию, и представляет собой многоуровневую архитектуру, где каждый из уровней выполняет свою функцию. Одной из общих задач сети

интернет и IoT является маршрутизация. Время для расчета оптимальных маршрутов в интернете значительно меньше по сравнению с IoT, поэтому необходимо использовать протоколы Сети, чтобы составлять карты маршрутов и корректировать их соответствующим образом. Другим отличием является то, что в интернете есть возможность очищать буферное пространство при перегрузке системы с последующим перезапуском ранее запущенных процессов. В случае с IoT нет возможности мгновенно исключить из сети БПЛА, т. к. они представляют собой физические объекты. Единственная возможность удалить их из воздушного пространства – экстренная посадка в заранее определенной зоне, что требует значительных затрат.

Модель взаимодействия элементов альтернативной сети. Воздушное пространство является ресурсом, который используют БПЛА. Для предлагаемой сети при работе с использованием других сетей структура воздушного пространства организована аналогично дорожной сети в городах. Движение БПЛА разрешено только на воздушных путях, узлах и перекрестках, образуемых как минимум двумя воздушными путями. Каждый из этих трех элементов имеет конкретную геометрическую форму и гарантированно должен обеспечивать безаварийную работу участка.

Движение БПЛА по воздушным путям и перекресткам должно строго регулироваться (например, БПЛА должны двигаться только в указанном направлении или по заданному маршруту), тогда как внутри узлов БПЛА должны находиться в режиме свободного полета.

Воздушное пространство разбивается на зоны, и, следовательно, каждая из зон содержит свои воздушные пути, перекрестки и узлы. Прилегающие зоны доступны друг для друга через входящие и исходящие ворота, которыми являются перекрестки на границе, однако они отличаются от других перекрестков, т. к. относятся к обеим зонам (рисунок 1).

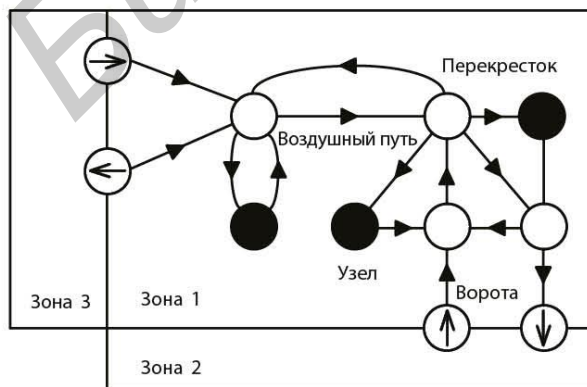


Рисунок 1 – Взаимодействие элементов сети в одной зоне

По воздушным путям не разрешается пересекать границу между двумя зонами, если только они не разделены на два пути с воротами на границе, соединяющей воздушные пути.

Взаимодействие в смежных зонах поясняется на рисунке 2. Для примера показаны четыре зоны. В каждой зоне путь между парой ворот называется транзитом и является характеристикой эффективности движения БПЛА в ее пределах. Параметрами эффективности могут быть время, расстояние, энергетические затраты, в т. ч. на передачу данных, и т. д.

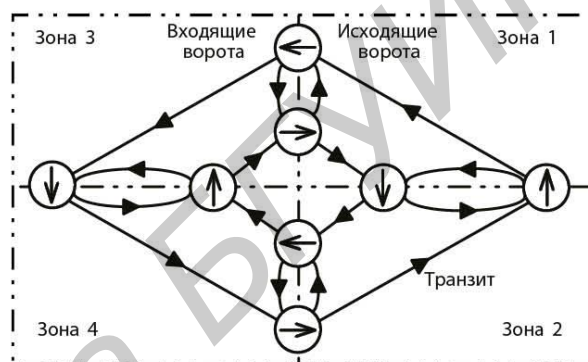


Рисунок 2 – Взаимодействие элементов сети в смежных зонах

Условно все элементы сети можно разделить на две большие группы: центры управления и сами БПЛА. Они объединяются в облако, и это дает возможность организовать связи между двумя любыми элементами сети.

В каждой зоне любая из обслуживающих компаний обеспечивает доступ к навигационной информации любому элементу сети. Лицензия на эксплуатацию той или иной зоны предоставляется регулируемыми органами. Они устанавливают и обеспечивают соблюдение законодательства.

Описание работы элементов альтернативной сети. Центры управления совместно регулируют деятельность ворот и координируют свои действия. То есть, когда БПЛА пересекает границу, данные должны быть переданы другой обслуживающей компании. Эта компания может дать БПЛА команду приземлиться или удерживать свое местоположение.

БПЛА должны иметь возможность автономной работы, быть хорошо оборудованы и в состоянии совершить аварийную посадку.

Аналогично многоуровневой архитектуре IoT разработана архитектура, разделенная на уровни. Многоуровневость дает множество преимуществ, таких как разделение задач, масштабируемость, возможность исправления ошибок и гибкость модификации уровня с минимальными изменениями, необходимыми для других уровней.

Целями создания архитектуры являются, во-первых, определение маршрута движения БПЛА от узла-источника к узлу-цели и координирование движения в воздушном пространстве, а во-вторых, создание доступной расширяемой платформы для общих текущих или будущих услуг.

Навигация БПЛА в процессе выполнения задачи может быть сокращена до трех видов подзадач. Во-первых, БПЛА должен будет пройти путь из исходной зоны в зону назначения. Во-вторых, чтобы двигаться в пределах каждой зоны, БПЛА должен пройти соответствующие воздушные пути и пересечения зоны. В-третьих, траектория пути должна быть выбрана так, чтобы БПЛА во время следования оставался внутри границ воздушных путей, перекрестков и узлов. За каждую из этих задач отвечает отдельный уровень.

Разрабатываемая архитектура представлена на рисунке 3 и состоит из пяти уровней. БПЛА

Приложения
Услуги
Взаимодействие устройств
Взаимодействие узлов
Воздушное пространство

Рисунок 3 – Уровни разрабатываемой архитектуры

имеют функции, которые соответствуют каждому из уровней, а центры управления имеют функции только на уровнях взаимодействия.

Опишем с точки зрения требуемых задач функции, необходимые для реализации архитектуры, которые осуществляют на каждом уровне центры управления и сами БПЛА.

Уровень воздушного пространства требует реализации следующих функций:

геометрическое представление элементов в зоне, т. е. представление воздушных путей, перекрестков и узлов;

трансляция данных о местоположении и данных о маршруте, т. е. БПЛА должны периодически транслировать свои трехмерные координаты и будущие траектории;

обеспечение траектории движения, т. е. центры управления должны обеспечивать расположение БПЛА в границах воздушных трасс, перекрестков и узлов планируемого пути;

точное управление в воздушном пространстве, т. е. требуется предусмотреть возможность запрашивать определенные маневры с БПЛА, такие как удержание, переход к новой точке или посадка в заданной точке;

экстренное маневрирование, т. е. в случае встречи двигающихся объектов на пути следования, таких как другие БПЛА или птицы,

затрудняющих прохождение воздушных путей или перекрестков, БПЛА должен избежать столкновения с ними, изменяя траекторию. БПЛА необходимо взаимодействовать с другими БПЛА в непосредственной близости с помощью стандартных протоколов для согласования маневров любого рода.

Уровень взаимодействия узлов реализует такие функции, как:

взаимодействие в одной зоне, т. е. центр управления обеспечивает работоспособность зоны, в которую от всех БПЛА поступает информация о текущих и планируемых маршрутах, перекрестках и узлах, а также об их динамическом взаимодействии в пути или в местах возможного пересечения. В центре управления имеется информация о точном количестве и расположении БПЛА на территории, а также хранятся метаданные для элементов сети;

трансляция данных между узлами, т. е. БПЛА обязаны сообщать центру управления свое текущее состояние, изменение скорости в пути, планируемый маршрут, расчетное время до заправки;

обеспечение безопасной посадки при непредвиденных обстоятельствах, т. е. должен быть предусмотрен маршрут посадки для БПЛА в экстренных ситуациях, который будет использован в случае невозможности продолжать движение по заданному пути, например из-за неожиданной разрядки батарей;

дозарядка, т. е. при необходимости центр управления должен обеспечить БПЛА путь к совместимой с ним станции зарядки;

точное управление в узле, т. е. должна быть предусмотрена возможность дать команду БПЛА удерживаться, двигаться к элементу сети или приземляться в узле;

оповещение в чрезвычайной ситуации, т. е. в случае программного или аппаратного сбоя, БПЛА должен транслировать сообщение SOS-центру управления, который в свою очередь должен оповестить все БПЛА и при необходимости внести изменения в их маршруты. Кроме того, центр управления должен фиксировать факт потери связи с БПЛА.

Уровень взаимодействия устройств требует реализации следующих функций:

взаимодействие в смежных зонах, т. е. в центр управления должны поступать информация об эффективности работы ворот и дополнительные сведения с БПЛА;

маршрутизация, т. е., учитывая вероятность того, что любые две смежные зоны имеют несколько ворот, центр управления должен обеспечивать БПЛА данными о каждом следующем воротах. Сбор данных о трафике, уровне заряда батарей, скорости,

расстоянии до цели, времени полета и др. может быть использован для сокращения маршрута в будущем;

«свободные руки», т. е. БПЛА должны уметь устанавливать связь с другим центром управления при вхождении в новую зону, а центр управления должен контролировать БПЛА, которые входят в зону и покидают ее.

Уровень услуг предполагает такую функцию, как трансляция данных в зоне, т. е. сообщения, относящиеся к данной зоне, могут передаваться всем БПЛА с использованием общей платформы. Для уровня приложений нет определенных требований.

Учитывая предложенные уровни разрабатываемой архитектуры и взаимодействие элементов сети в зонах, можно представить альтернативную сеть связи как мультиагентную самоорганизующуюся систему. Под мультиагентной системой понимается набор единиц физических устройств, помещенных в единую среду, в которой они могут осуществлять информационный обмен друг с другом и взаимодействовать определенным образом со средой. При этом компоненты мультиагентной системы обладают следующими свойствами: они автономны, управляются по централизованному или децентрализованному принципу и могут получать информацию из ограниченной части окружающей среды.

Основными принципами мультиагентной системы являются самостоятельность каждого объекта системы, возможность получения только локальной информации, в т. ч. от ближайших агентов-соседей, и децентрализация управления. При помощи сенсоров БПЛА могут получать только локальную информацию (в пределах действия сенсоров).

Существует множество практических задач, связанных с управлением БПЛА: поиск объекта, транспортировка груза, мониторинг, поисково-спасательные работы, исследование труднодоступных территорий. Однако выполнение каждой из этих задач подразумевает решение такой важной подзадачи, как координация движения БПЛА. Поэтому возникает необходимость разработать децентрализованное правило управления и алгоритм, которые позволили бы осуществлять эффективное управление движением БПЛА с сохранением геометрической формы строя при условиях полной автономности БПЛА и получения информации только от своих ближайших соседей.

Группа из одинаковых БПЛА должна сформировать строй, имеющий заданную геометрическую структуру, и осуществить движение вдоль целевой траектории и к целевой точке. При этом БПЛА автономны и имеют ограничения дальности связи

с другими БПЛА из группы. Простейшим примером геометрической структуры строя в пространстве может служить прямая линия.

Комбинированный подход заключается в гибком сочетании принципов централизованного и децентрализованного управления. Этот подход удобно реализовать как иерархическую структуру управления, в которой одни БПЛА исполняют роль центра координации и управления подгруппой других БПЛА. При этом БПЛА-координатор может выбираться динамически из каждой подгруппы БПЛА либо вместо БПЛА-координатора в процесс управления может вмешаться оператор.

При централизованном принципе управления четко определены маршруты следования каждого БПЛА и род выполняемых ими задач, поэтому следует рассмотреть применение децентрализованного принципа мультиагентной системы на случай отсутствия связи с центром.

Правило управления. Рассмотрим принцип управления с голономной моделью связей. Голономные системы используются для моделирования аппаратов, которые не имеют ограничений при смене направления движения.

Пусть БПЛА движется с постоянной скоростью. При подаче управляющего сигнала на установку новой величины скорости контроллер БПЛА обеспечивает плавное изменение скорости до заданной, но переходный период длится сравнительно мало по сравнению с периодом движения с постоянной скоростью и с быстродействием систем БПЛА. При реализации управления по скорости предполагается, что переходный период плавного изменения скорости после поступления управляющего сигнала о смене скоростного режима длится не более Δt – периода, необходимого на выработку нового управляющего сигнала. Для управления по ускорению должно учитываться ограничение на максимальное ускорение a_{\max} .

Скорость БПЛА ограничена максимально допустимой скоростью, зависящей от его конструкции. Потому можно считать, что величина скорости i -го агента является кусочно-постоянной функцией от времени (не учитываем время на переход из одного скоростного режима в другой) и не превышает максимально допустимой величины скорости агента – V_{\max} .

Одним из распространенных децентрализованных методов управления движением группы роботов является метод потенциальных функций [2]. Суть метода заключается в формировании закона управления при помощи искусственной, так называемой потенциальной функции, которая создает

некоторое потенциальное силовое поле. Ускорение каждого агента прямо пропорционально значению функции в определенный момент времени. Под действием силы агенты либо притягиваются (если они далеко друг от друга, но в зоне видимости), либо отталкиваются (если они слишком близко). Например, сила, действующая на i -го агента, может быть рассчитана следующим образом:

$$\vec{F}_i = \sum_{P_j: r_{ij} > R} k_1 \vec{r}_{ij} + \sum_{P_k: r_{ik} \leq R} \frac{k_2 \vec{r}_{ik}}{r_{ik}^2},$$

где \vec{r}_{ij} – вектор расстояния между агентами

i и j (имеющими координаты p_i и p_j

соответственно), $r_{ij} = \|\vec{r}_{ij}\|$;

$k_1, k_2 \in \mathbf{R}$ – настраиваемые параметры.

В случае движения к общей целевой точке добавляется соответствующая компонента силы притяжения к ней. Однако при своей простоте и устойчивости к сохранению стабильной работы метод потенциальных функций не обеспечивает соблюдения геометрической структуры строя. Поэтому в большинстве случаев для решения задачи управления строем используются следующие подходы: первый – задать заранее желаемое расстояние между парами агентов и применить теорию жесткости графов [3]; второй – задать желаемое положение агента относительно его соседей через вектора и воспользоваться правилами консенсуса (усреднения) [4]; третий – в каждый момент времени передавать агентам информацию о положении и направлении движения, на основании чего каждый агент может сконструировать виртуального лидера и следовать за ним [5].

Будем рассматривать задачу в ограниченном открытом связном множестве W , которое является подмножеством трехмерного вещественного пространства, с учетом движения БПЛА в трехмерном пространстве \mathbf{R}^m ($W \in \mathbf{R}^m, m = 3$). Множество W моделирует зону выполнения миссии. Пусть в W введена неподвижная прямоугольная система координат OXY и OXZ с центром координат в точке O и осями OX , OY и OZ .

В W существует упорядоченный конечный набор целевых точек T^1, T^2, \dots, T^l , которые БПЛА должны посетить в порядке возрастания номеров индексов целевых точек либо в порядке, задающем некоторую траекторию. Положение и количество всех целевых точек известны БПЛА в каждый момент времени и могут меняться во времени. Еще не посещенная целевая точка с наименьшим номером называется текущей целевой точкой.

Группа БПЛА, выполняющих задачу, моделируется группой голономных агентов A_1, \dots, A_n , которые

имеют в W координаты $p_1(t), \dots, p_n(t)$, т. е. агенты являются материальными точками, двигающимися в пространстве. Начальные позиции n агентов – $p_1(t_0), \dots, p_n(t_0)$ – задаются произвольно и заранее не известны.

Допустим, что управление i -м агентом действует напрямую на скорость самого агента. Под управлением по скорости понимается закон, описывающий динамику агента:

$$\dot{p}_i(t) = u_i(t),$$

$$p_i(t_0) = p_{i0},$$

где u_i – управление для i -го агента, процесс управления начинается с $t = t_0 = 0$.

Допущение возможности управления по скорости описано выше. Можно считать, что величина скорости i -го агента $\|p_i(t)\|$ является кусочно-постоянной функцией от времени. Кроме того, скорость БПЛА ограничена максимально допустимой скоростью V_{\max} , определяемой особенностями его конструкции.

Пусть Δt – временной промежуток, требуемый для выполнения агентами одного цикла управления: снятие показаний сенсоров, вычисления с использованием полученной от сенсоров информации и выполнение передвижения в соответствии с выполненными вычислениями.

Рассматриваемый класс управлений – это векторные функции $u_i(t): \mathbf{R}^+ \rightarrow \mathbf{R}^3$, удовлетворяющие условиям:

- $\|u_i(t)\|$ – кусочно-постоянная функция от t , u_i может менять свое значение в моменты $t = q\Delta t, q = 0, 1, \dots$;
- для любого $t \geq 0$ выполнено неравенство $\|u_i(t)\| \leq V_{\max}$.

Первое условие определяется применением цифровых систем, вырабатывающих дискретный управляющий сигнал, который может менять свое значение только через равные промежутки времени Δt , величина которых зависит от ограниченного быстродействия системы.

Второе условие связано с конструктивными ограничениями максимальной скорости движения БПЛА, управление по скорости должно их учитывать. Также допустимый разрыв функции $\|u_i(t)\|$, а значит, и допустимый разрыв $\|\dot{p}_i(t)\|$ не превышают V_{\max} . При этом также верно, что $\|\dot{u}_i(t) - u_i(t')\| \leq 2V_{\max}$, $\|\dot{p}_i(t) - \dot{p}_i(t')\| \leq 2V_{\max}$ при $t \neq t'$.

Для простоты под обменом информацией между агентами подразумевается передача информации о координатах того или иного агента.

Пусть радиус r определяет радиус слышимости: агенты i и j могут обмениваться информацией напрямую, если $\|p_i - p_j\| \leq r$. Если i -й и j -й агенты не находятся в прямой слышимости, то они могут обмениваться информацией через других агентов, находящихся в прямой слышимости. Например, если $\|p_i - p_k\| \leq r$ и $\|p_k - p_j\| \leq r$, то передача информации между A_i и A_j возможна.

Все задачи рассматриваются в среде без препятствий, помех и ошибок измерения. Обмен информацией между агентами происходит мгновенно, а их действия – синхронно. Протокол связи между агентами требует отдельного описания.

Под строем из k агентов A_1, \dots, A_k в момент времени будем понимать набор координат этих агентов $p_1(t), \dots, p_k(t)$. Геометрическая структура строя должна быть задана определенным образом для всех агентов.

Требуется разработать управление, эффективно работающее в условиях непредсказуемого изменения ситуации, что вынуждает отказаться от жесткой привязки агента к определенной позиции в строю. Предлагается единожды перед началом выполнения миссии задать геометрические структуры строя для групп всевозможных допустимых размеров одинаковым образом для всех агентов. Тогда геометрические структуры и будут параметром управления.

При построении строя следует определить виртуального лидера группы. Под виртуальными лидерами $L_{k,1}^j, \dots, L_{k,k}^j$ понимается набор из k точек, принадлежащих W , координаты которых рассчитаны в мировой системе координат по определенному правилу агентом A_j , находящимся в составе группы связности размера k . Под группой связности понимается группа агентов, в которой каждый агент находится в отношении слышимости с любым другим, и не существует агента вне этой группы, который бы находился в отношении слышимости с каким-либо агентом из данной группы.

Каждый агент, зная k – число агентов в группе связности, самостоятельно рассчитывает координаты k виртуальных лидеров. Для расчета $L_{k,i}^j$ предлагается использовать ортогональные преобразования над координатами F_k^j , что повлечет за собой изоморфность геометрического строя и структуры, которую образуют виртуальные лидеры каждого агента. Иными словами, геометрический строй и совокупность виртуальных лидеров агента A_i будут задавать одну и ту же геометрическую фигуру в пространстве с точностью до поворота и параллельного переноса.

Таким образом, каждому агенту A_i и геометрическому строю из k точек будет соответствовать группа из k лидеров.

В правиле расчета координат виртуальных лидеров каждым агентом проявляется значительное отличие от существующих подходов использования виртуальных лидеров, в которых либо координаты виртуальных лидеров задаются вне мультиагентной системы и передаются агентам как данность, либо траектория и скорость движения виртуальных лидеров фиксированны и известны агентам заранее до начала миссии.

Пусть агенты A_1, \dots, A_n помещены в W для выполнения миссии по движению к целевой точке T^* строем с приемлемой точностью. В момент времени t_0 агенты располагаются в произвольно заданных координатах – $p_1(t_0), \dots, p_n(t_0)$.

Миссия для агентов A_1, \dots, A_n считается выполненной, если в некоторый момент времени $t' < \infty$ для группы связности N_p , состоящей из подмножества агентов A_1, \dots, A_n , выполнены следующие условия:

- условие достижения целевой точки с необходимой точностью, состоящее в том, что

$$\left\| \frac{1}{k} \sum_{A_i \in N_p} p_i(t') - T^* \right\| \leq V_{\max} \Delta t;$$

- условие соблюдения заданного геометрического строя с необходимой точностью, заключающееся в том, что, начиная с определенного момента $t < t'$, для каждого агента A_i существует виртуальный лидер $L_{k,i}^{j_i}$, $j_i = j(i, t)$, который находится в δ -окрестности A_i и $\delta \leq V_{\max} \Delta t$.

Лидер $L_{k,i}^{j_i}$ – это один из k лидеров $\{L_{k,i}^1, \dots, L_{k,i}^k\}$ агента A_i . Зависимость $j_i = j(i, t)$ подчеркивает, что для каждого агента i существует лидер с индексом j_i из его набора лидеров, а также то, что j_i может изменять свое значение по мере движения.

Чтобы i -й агент двигался к виртуальным лидерам, направление его скорости должно быть линейной комбинацией направлений к каждому из виртуальных лидеров, коэффициенты линейной комбинации позволят осуществить выбор более и менее приоритетных направлений. Обозначим такую линейную комбинацию

$$\theta_i = \sum_{j=1}^k c_{ij} (L_{k,i}^j - p_i),$$

где $c_{ij} \in \mathbf{R}$ – весовые коэффициенты линейной комбинации, отражающие приоритет каждого из направлений.

Линейная комбинация $\theta_i(t)$ такова, что $\|\theta_i(t)\|$ – не ограниченная функция. Поэтому при формировании управления нужно вводить нормировочный коэффициент, например $u_i = \frac{kV_{\max}}{\|\theta_i\|} \theta_i, 0 \leq k \leq 1$. Тогда фактически при формировании управления используется лишь направление, задаваемое θ_i , а $\|\theta_i\|$ можно отрегулировать при помощи нормировочных коэффициентов. В силу того что $\|\theta_i(t)\|$ – кусочно-постоянная функция, допускается дискретное изменение величин коэффициентов k и c_{ij} по мере движения. Периодичность пересчета коэффициентов должна соответствовать быстродействию системы, т. е. изменение значений коэффициентов целесообразно производить не чаще, чем через промежутки времени Δt .

Поскольку агенты должны сформировать единый строй, одинаковый для всех агентов, а их движение происходит вслед за виртуальными лидерами, то последние должны отражать геометрическую структуру строя, а их координаты должны быть определены всеми агентами единым образом. Чтобы обеспечить схожесть результатов расчетов, нужно использовать одинаковые входные данные. К информации, которая одинакова для всех агентов, относятся: количество агентов в группе связности k , координаты агентов из группы, координаты целевой точки T^* .

Обозначим A_{cm} центр масс агентов из рассматриваемой группы связности, т. е. $A_{cm}(t) = \sum_{A_i \in N_p} p_i(t)$.

Углы между направлением $A_{cm}T^*$ и осями OY и OZ будут характеризоваться углом

$$\beta = \arctan \frac{(A_{cm}T^*)_y}{(A_{cm}T^*)_x} \frac{\pi}{2}.$$

Чтобы агенты выстроили строй, соответствующий геометрической структуре, заданной при помощи F_k , набор виртуальных лидеров $\{L_{k,i}^1, \dots, L_{k,i}^k\}$ агента A_i должен быть изоморфен F_k , т. е. для получения координат виртуальных лидеров нужно осуществлять ортогональные преобразования над координатами F_k . Эти преобразования целесообразно сделать таким образом, чтобы лидеры двигались вдоль направления от центра масс группы к целевой точке. Осуществим над системой координат, в которой задана F_k , и над точками самой геометрической структуры строя поворот на угол β и параллельный перенос на радиус-вектор центра масс агентов из группы N_p . Общий вид данного преобразования будет следующим:

$$R_\beta^2 F_k^j + \frac{\sum_{l=1}^k p_l}{k}, j = 1, \dots, k,$$

где R_β – это матрица поворота на угол β ,

$$R_\beta = \begin{pmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}.$$

Получим систему координат с центром координат в точке A_{cm} , причем ось ординат которой будет коллинеарна вектору $A_{cm}T^*$, и набор из k точек, которые можно использовать для расчета положения виртуальных лидеров.

Если координаты одного из виртуальных лидеров и агента совпадают, то движение агента прекратится, несмотря на то, что целевая точка может быть еще не достигнута, и тогда для устранения этого эффекта требуется ввести в правило расчета виртуальных лидеров постоянный вектор сдвига D_u .

Подбор $\|D_u\|$ следует выполнить таким образом, чтобы был найден баланс между дистанцированием лидеров для обеспечения движения и некоторым постоянством приоритетности лидеров для каждого агента. При слишком большой дистанции между агентом и лидерами может наблюдаться нецелесообразное перемещение агента из одного положения в структуре строя в другое.

Тогда итоговое правило расчета координат виртуальных лидеров можно записать следующим образом:

$$L_{k,i}^j = R_\beta^2 (F_k^j + D_u) + \frac{\sum_{l=1}^k p_l}{k}.$$

Предположим, что лидер $L_{k,i}^j$ находится в прямом преследовании агентом A_p , если расстояние между ними не превышает величины $V_{\max} \Delta t$. Это означает, что агент находится максимально близко к лидеру (на расстоянии, не превышающем максимального перемещения за один шаг алгоритма).

Итоговое правило управления имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{p}_i = \frac{q_i V_{\max}}{\|\theta_i\|}, \\ \theta_i = \sum_{j=1}^k c_{ij} (L_{k,j}^j - p_i), \\ L_{k,j}^j = R_\beta^2 (F_k^j + D_u) + \frac{\sum_{A_i \in N_p} p_i}{k}, \\ p_i(t_0) = p_{i0}. \end{cases}$$

В правило управления введен нормировочный коэффициент $\dot{p}_i = \frac{q_i V_{\max}}{\|\theta_i\|}$ для ограничения на максимальную скорость, $q_i \in [1, 0]$ – понижающий

коэффициент, отличный от единицы только в том случае, если лидер находится в прямом преследовании агентом. Таким образом, $q_i = \frac{\|L_{k,i}^* - p_i\|}{V_{\max}}$.

Такое понижение скорости необходимо, чтобы агент не оказался впереди лидера.

При достижении текущей целевой точки, т. е. при выполнении неравенства $\|T^* - A_{cm}\| \leq V_{\max} \Delta t$, либо следующая целевая точка становится текущей, либо происходит остановка, если иных целевых точек нет.

Заключение. Проектируемая альтернативная сеть, использующая БПЛА в качестве своих элементов, позволит обеспечивать связь в труднодоступных местах, при чрезвычайных ситуациях, для улучшения качества связи. На основе теории мульти-агентных систем сформулированы правило расчета координат виртуальных лидеров и правило управления группой агентов.

Полученные общие уравнения правила управления по скорости можно адаптировать к правилу управления по ускорению, что позволит достичь ускоренной стабилизации ошибки геометрической структуры строя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Половения, С.И. Автономная адаптируемая система связи / С.И. Половения // Проблемы инфокоммуникаций. – Минск, 2015. – № 2. – С. 11–17.
2. Hengster-Movric, K., Bogdan, S., Draganjac, I. Multi-Agent Formation Control Based on Bell-Shaped Potential Functions // Intelligent Robotic Systems. – 2010. – Vol. 58, № 2. – P. 165–189.
3. Eren, T., Belhumeur, P., Anderson, B. et al. A framework for maintaining formation based on rigidity // Proc. of the 15th IFACWorld Congress. Vol. 15. Barcelona: International Federation of Automatic Control, 2002. – P. 1306–1306.
4. Wang, J., Nian, X., Wang, H. Consensus and formation control of discrete-time multi-agent systems // Journal of Central South University of Technology. – 2011. Vol. 18, № 4. – P. 1161–1168.
5. Zhonghai, Z., Jian, Y., Wenxia, Z., et al. Formation control based on a virtual-leader follower hierarchical structure for autonomous underwater vehicles // International journal of advancements in computing technology. – 2012. – Vol. 4, № 2. – P. 111–121.

An approach to the creation of alternative communication networks, interaction model of unmanned aerial vehicles in one or several neighboring zones. Given architecture levels Internet of Things and their correlation with the proposed communication system, are marked features of each level. A network of independent work and work in cooperation with existing networks. Described generally control a group of UAVs for a holonomic link model.

Получено 11.11.2016.



Один из крупнейших информационных центров Беларуси предлагает специалистам ознакомиться с новыми изданиями по теме «Телекоммуникации и связь»



Цуканов В.Н.,
Яковлев М.Я.

Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. – М.: Инфра-Инженерия, 2014. – 304 с.

Рассмотрена отечественная волоконно-оптическая компонентная база, предназначенная для жестких условий эксплуатации. Приведены основные технические характеристики оптических волокон, волоконно-оптических кабелей, оптических соединителей, объединителей, разветвителей, переключателей, пассивных и активных волоконно-оптических линий задержки, дискретных передающих и приемных оптоэлектронных модулей, оптических трансиверов и ретрансляторов, а также методы их измерения.

Предложены методы контроля параметров безотказности волоконно-оптических компонентов с учетом их принципиальных отличий от электронных компонентов.

Книга содержит практические рекомендации по построению традиционных и оригинальных цифровых волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), оптических концентраторов, коммутаторов, медиаконвертеров, автономных источников питания узлов подводных ВОСП, волоконно-оптических систем распределения СВЧ-сигналов, волоконно-оптических фазовращателей, активных волоконно-оптических линий задержки, оптоэлектронных генераторов СВЧ-диапазона, оптоэлектронных АЦП и ЦАП.

Книга рассчитана на широкий круг читателей: студентов, инженерно-технических работников, ученых, интересующихся данной тематикой и профессионально связанных с разработкой или эксплуатацией волоконно-оптической техники.

© Цуканов В.Н., Яковлев М.Я., 2014
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2014
УДК 621.391(075.8)
ISBN 978-5-9729-0078-7

Более подробную информацию о режиме работы и услугах можно получить по адресу:
220004, г. Минск, просп. Победителей, 7, РНТБ,
тел.: 203-31-00, www.rlst.org.by,
e-mail: rlst@rlst.org.by.