

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Математико-механический факультет

Кафедра системного программирования

**РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
ГРУППОЙ БПЛА**

Дипломная работа студента 544 группы

Леви Сергея Александровича

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

Граничин О.Н.

Рецензент

аспирант

Васильев В.И.

Допустить к защите:

Зав. кафедрой

д.ф.-м.н, профессор

Терехов А.Н.

Санкт-Петербург

2010

St.Petersburg State University
Faculty of Mathematics and Mechanics
Department of Software Engineering

MULTIAGENT SYSTEM FOR CONTROLLING A GROUP OF UAVS

A graduate work by
Levi Sergey Aleksandrovich

Academic advisor

Dr. of Phys. and Math. Sci., Prof. _____ Granichin O.N.

Reviewer

post-graduate student _____ Vasilyev V.I.

Admitted to defence

Head of department

Dr. of Phys. and Math. Sci., Prof. _____ Terekhov A.N.

St.Petersburg

2010

Оглавление

1	Введение	2
1.1	Область применения БПЛА. Эксплуатация автономных групп БПЛА. Малые и сверхмалые БПЛА и специфика их эксплуатации . . .	2
1.2	Решение задачи максимизации времени полёта малых и сверхмалых БПЛА за счёт использования даровой энергии окружающей среды. Оптимизация с применением мультиагентного подхода . . .	6
2	Постановка задачи	9
3	Аппаратная архитектура беспилотного комплекса	11
3.1	Используемые БПЛА и их основные характеристики. Вычислительные системы, обеспечивающие автономный полёт БПЛА	11
3.2	Оборудование наземной станции контроля полёта. Используемые интерфейсы связи	14
4	Технология разработки мультиагентного ПО для управления группой БПЛА	16
4.1	Создание МАС с использованием фреймворка JADE	16
4.2	Многослойная система	19
5	Решение задачи максимизации времени полёта группы БПЛА	23
6	Заключение	27

Глава 1

Введение

1.1 Область применения БПЛА. Эксплуатация автономных групп БПЛА. Малые и сверхмалые БПЛА и специфика их эксплуатации

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) используются для решения разнообразных военных и мирных задач, которые прежде решались с использованием пилотируемых самолётов и вертолётов. Эксплуатация БПЛА в большинстве случаев сравнительно дешева, а их невысокая в сравнении с пилотируемыми ЛА собственная стоимость и отсутствие людей на борту позволяют отправлять их на выполнение заданий, в которых существует значительная опасность потери летательного аппарата. Первоначально БПЛА управлялись удалённо с земли, но современные беспилотные системы всё чаще оснащаются автопилотом и бортовым компьютером, которые позволяют им решать в автономном режиме весьма сложные задачи. Необходимость в автономном функционировании может возникать в тех случаях, когда управление БПЛА с земли затруднено, – например, в силу большого удаления, особенностей местности, необходимостью радиомолчания или даже сложностью лицензирования радиочастот. Использование автономных БПЛА позволяет также избежать необходимости многочасового ручного пилотирования человеком по зара-

нее заданному маршруту – к примеру, в тех задачах, в которых конечной целью является аэрофотосъёмка удалённого объекта.

Одной из наиболее перспективных тем исследований в области эксплуатации БПЛА на сегодняшний день является задача создания самоуправляемой группы летательных аппаратов. Необходимость в такой группе возникает естественным образом при решении ряда практических задач. В качестве примера рассмотрим задачу обнаружения источников радиосигнала при помощи группы БПЛА, которая была решена в Университете Карнеги-Мелони [8]. В этой задаче рассматривалась ситуация, когда неограниченное количество радиоисточников перемещаются по заданной территории с постоянной скоростью. Один БПЛА не в состоянии определить местоположение объектов из-за сильной зашумленности входного сигнала и невозможности измерения уровня сигнала в нескольких точках одновременно. В то же время группе БПЛА удаётся успешно преодолеть эти сложности путём построения распределённого байесового фильтра, который обобщает накопленные группой знания и кластеризует их по группам. Также заслуживает внимания система, разработанная в исследовании [6], в котором перед группой БПЛА ставилась задача построить на основе наблюдений свободный от препятствий маршрут для наземных роботов, движущихся из начальной точки к цели. Эта работа показывает большой потенциал использования групп БПЛА для мониторинга состояния дорог и выявления транспортных уплотнений. Преимущество автономной группы БПЛА становится очевидным также в задачах, в которых возможно распараллеливание сложной задачи на несколько аппаратов – например, в задаче аэрофотосъёмки большой территории. Наконец, в миссиях, в которых существует существенный риск потери одного или нескольких аппаратов, использование группы повышает вероятность успешного завершения.

В настоящее время для создания распределённых интеллектуальных систем чаще всего используется подход множественных интеллектуальных агентов. Этот подход позволяет построить системы со сложной стратегией, при том что строительные блоки этой системы – отдельные агенты, – могут руковод-

ствоваться весьма простыми стратегиями. Для организации автономных групп БПЛА также разумно использовать мультиагентный подход. Среди преимуществ этого подхода следует особо отметить то, что он допускает динамическое перераспределение задач между агентами в группе и динамическое изменение общей стратегии поведения.

Мультиагентная стратегия для группы БПЛА реализуется путем разработки интеллектуальных агентов, представляющих логику поведения каждого аппарата. Каждый агент хранит свое состояние и имеет доступ к общему разделяемому ресурсу, через который участники обмениваются информацией. Разрабатывается алгоритм общения агентов, который регламентирует то, как происходит обмен информацией. Блок, отвечающий за коммуникацию, занимается сериализацией и десериализацией пакетов, передаваемых в системе. Он предоставляет для них простой класс-обертку, который может быть преобразован в файл любого формата, чаще всего в XML, для удобства хранения и обработки информации в системе. Средства разработки мультиагентных систем предоставляют широкий выбор инструментов, которые позволяют поддерживать многие существующие протоколы передачи данных.

В мультиагентной системе агент — это логическая единица функциональности. При этом не возникает никаких специальных требований, которым должна удовлетворять используемая архитектура.

Существующие на сегодняшний день БПЛА значительно разнятся по своим размерам, лётным характеристикам и многим иным параметрам. В то время, как некоторые аппараты лишь немногим уступают в размерах современным реактивным истребителям, иные способны держать в руках даже ребёнок. В настоящей работе рассматриваются, прежде всего, классы малых и сверхмалых беспилотных самолётов. Чаще всего это лёгкие устройства, приводимые в движение электродвигателем, способные выполнять задачи слежения за объектами, аэрофотосъёмку местности, сбора метеоданных, целенаведения и многие другие. Аппараты этого класса не несут на борту какого-либо ударного вооружения.

Сверхмалые БПЛА имеют ряд эксплуатационных преимуществ в сравнении с их более крупными собратьями. Так, они обычно значительно дешевле в эксплуатации и по собственной стоимости; их размеры, малошумный и мало нагревающийся двигатель усложняют их радиолокацию и делают их сложной мишенью для средств противовоздушной обороны. Однако эти же факторы отрицательно сказываются на лётных характеристиках устройств этого класса. Один из наиболее существенных недостатков лёгких ЛА заключается в том, что подобная конфигурация не позволяет оснастить их аккумуляторами большой ёмкости, которые будут попросту слишком тяжелы для того, чтоб данный аппарат мог взлететь. Ёмкость аккумуляторов, которые обычно устанавливаются на сверхмалых БПЛА, таким образом, невелика и сильно ограничивает продолжительность автономного полёта. Даже в наиболее благоприятных условиях она не превышает одного-двух часов. Ограничение на время полёта естественным образом ограничивает радиус действия БПЛА несколькими десятками километров.

В настоящей работе мы предлагаем технологию создания систем для управления автономными группами БПЛА с использованием мультиагентного подхода. Для упрощения процесса разработки и возможности переиспользования компонент системы, нами используется трёхслойная модель, которая будет описана далее. Также будет описан созданный нами фреймворк для реализации мультиагентных решений для беспилотных систем.

1.2 Решение задачи максимизации времени полёта малых и сверхмалых БПЛА за счёт использования даровой энергии окружающей среды. Оптимизация с применением мульти-агентного подхода

В последнее время различными исследователями были изучен ряд методов увеличения времени автономного полёта сверхмалых БПЛА. В основе всех этих методов обычно лежит идея использования источников даровой энергии в окружающей среде. Такими источниками являются солнечное излучение и потоки восходящего воздуха, возникающие по различным причинам в нижних слоях атмосферы.

Остановимся более подробно на последнем методе. Метеорология различает несколько причин возникновения восходящих потоков воздуха. Среди них – обтекание горизонтальными потоками возвышенностей в горной местности, столкновение масс горячего и холодного воздуха, но всё же чаще всего восходящие потоки образуются в результате нагревания приземного слоя воздуха солнечными лучами. Массы нагретого, более лёгкого воздуха отрываются от земли и под действием архимедовой силы «всплывают» вверх, где охлаждаются и вновь опускаются вниз, что порождает циркуляцию. Содержащийся в этих воздушных массах в больших концентрациях водяной пар при охлаждении конденсируется и образует облако. При интенсивном нагреве поверхности земли, приземной воздух нагревается достаточно быстро и всплывающие массы воздуха образуют непрерывную восходящую трубу. В грубом приближении форма этих потоков – тор, центр которого движется с достаточно большой скоростью вверх, а края, с меньшей скоростью, – вниз.

Количество, диаметр и интенсивность потоков над неким участком земной поверхности зависит от многих факторов, таких, как метеоусловия, время го-

да, топологические особенности местности. Высота же потоков зависит, главным образом, от разности температур нагретого воздуха и воздуха окружающей среды при возникновении потока и от точки росы – метеорологического показателя, обозначающего температуру конденсации водяного пара в данных условиях. Такие восходящие потоки, образующиеся над сушей, почти всегда – в светлое время суток, – называются термиками. Большие птицы, дельта- и парпланеристы используют их в своём полёте: обнаруживая термик, они набирают высоту, вращаясь вокруг его центра, а затем продолжают полёт до обнаружения следующего термика. Продолжительность их полёта ограничена, главным образом, тем, насколько успешно они обнаруживают термики.

Энергия термиков уже давно используется, вслед за пилотами пилотируемых планёров, операторами беспилотных планёров и мотопланёров, пилотируемых с земли, для продления времени полёта. Возможность же использования энергии термиков сверхмалыми БПЛА в режиме автономного полёта, управляемого автопилотом, была изучена несколькими американскими исследователями. Так, Аллэн провёл работу по моделированию восходящих потоков в атмосфере и по их использованию для автономного планирования [2]. Описанная им стратегия полёта легла в основу автопилота, который был испытан в реальных условиях. В проведенном эксперименте был запущен легкий беспилотный мотопланёр, целью которого было непрерывное наблюдение за неподвижным наземным объектом с использованием техники планирующего полета для увеличения длительности полета. На протяжении всего опыта аппарат двигался по спиралевидной траектории в заданном опрокинутом конусе, в вершине которого лежал наблюдаемый объект, и не опускался ниже 200 м. Характерная траектория движения БПЛА при выполнении подобного полета показана на Рис. 1.

Аналогичные эксперименты были проведены Дэном Эдвардсом [4]. Их целью была именно максимизация времени автономного полёта безмоторного планёра. Исследование показало, что только 21 % общего времени был потрачен на поиск термиков и набор высоты в них. При этом остальные 79 % — это время

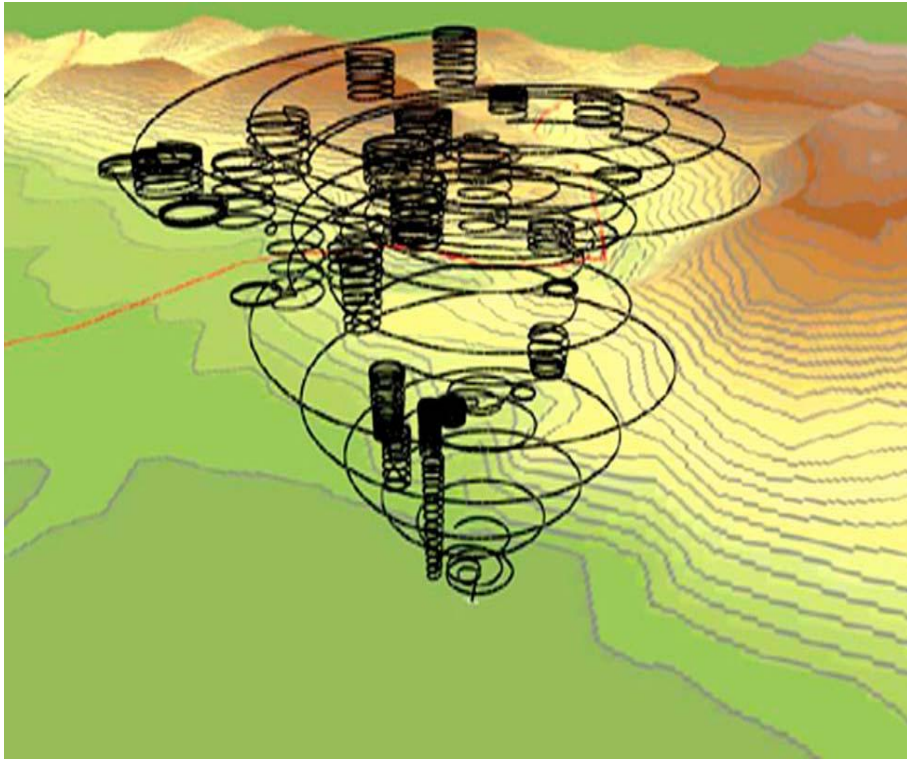


Рис. 1. Траектория БПЛА при осуществлении наблюдения за объектом с использованием техники планирующего полета.

следования по маршруту. При этом общее время нахождения планера в воздухе составляло 98 минут.

В рамках проведённого нами исследования был выявлен способ улучшения описанного выше метода увеличения времени полёта БПЛА, использующий преимущества автономной группы летательных аппаратов. Этот метод будет описан ниже. Также, будет представлена его опытная реализация на основе разработанного нами мультиагентного фреймворка.

Глава 2

Постановка задачи

Глобальной целью проводимого нами исследования является разработка технологии, которая может быть применена для создания мультиагентных систем для решения самых разнообразных задач с использованием автономной группы БПЛА. Данная технология представляет собой спецификацию логической и физической архитектуры мультиагентной системы, спецификацию процесса разработки системы, а также программный фреймворк, в котором могут быть реализованы стратегии агентов. В рамках настоящей работы мы попытались сформировать общий подход к разработке мультиагентных беспилотных систем, описать примерную архитектуру такой системы, а также создали прототип программного фреймворка. С применением данного фреймворка нами была выполнена тестовая реализация мультиагентной системы (МАС) для управления группой сверхмалых БПЛА, решающей задачу полёта по маршруту с минимизацией энергозатрат.

Для выполнения поставленной задачи нами рассматривается трёхслойная модель системы, включающая в себя высокоуровневую спецификацию задачи, поставленной перед группой БПЛА, промежуточный слой, реализующий логику поведения агентов, а также нижний слой, отвечающий за управление системами летательного аппарата и базовой станции и обеспечивающий связь между всеми устройствами. Нами подробно рассматривается мультиагентное ПО, составляющее промежуточный слой системы, который отвечает за координацию

взаимодействия между уровнями. В качестве основы для создания подобного ПО для решения произвольных задач автономной группой БПЛА предлагается прототип фреймворка на языке Java, созданного с использованием JADE – универсального фреймворка для мультиагентных решений.

Мы описываем характеристики лёгких БПЛА и даём обзор программно-аппаратных решений, которые используются при создании автопилотных систем для подобных летательных аппаратов. Далее, мы описываем аппаратную архитектуру, на основе которой может быть реализовано предлагаемое нами мультиагентное решение. Приводится описание вычислительных устройств, которыми оснащены летательные аппараты и наземная станция, а также используемых устройств и протоколов связи.

В качестве примера использования предлагаемой технологии мы представляем реализацию энергосберегающей мультиагентной стратегии для группы БПЛА с использованием даровой энергии восходящих термических потоков воздуха, о которой было упомянуто выше. В рамках этой задачи мы предлагаем простую мультиагентную стратегию, которая позволяет группе из нескольких БПЛА, летящей по одному маршруту, более эффективно, чем в случае использования одного БПЛА обнаруживать термики и использовать их для набора высоты. В дальнейшем эта стратегия может быть обобщена для более сложных сценариев полёта. Мы рассматриваем реализацию этой стратегии с использованием предложенного нами фреймворка на базе JADE. На данном этапе исследования для моделирования работы созданного ПО используется среда, симулирующая полёт летательного аппарата в условиях поля с восходящими термическими потоками и обеспечивающая обмен данными между несколькими сущностями, представляющими летательные аппараты.

Глава 3

Аппаратная архитектура беспилотного комплекса

3.1 Используемые БПЛА и их основные характеристики. Вычислительные системы, обеспечивающие автономный полёт БПЛА

Предлагаемое в настоящей работе мультиагентное решение может быть применено в системах значительно разнящихся как по своему назначению, так и по используемым в них летательным аппаратам. Однако прежде всего, данное решение ориентировано, как уже было упомянуто выше, на сравнительно недорогие малые и сверхмалые БПЛА, приводимые в движение электродвигателем. Для того, чтоб эффективно использовать метод сокращения расхода энергии и максимизации времени полёта с использованием энергии термиком, летательный аппарат должен быть способен планировать с медленной потерей высоты. Примером такого БПЛА является, например, лёгкий мотопланёр, рассматриваемый в работе Аллена [2]. Скорость снижения такого планёра в горизонтальном полёте равна примерно 0,5 м/с, скорость его горизонтального полёта - примерно 12 м/с. В экспериментах Эдвардса [4] применялся безмоторный планёр с аналогичными лётными характеристиками. Небольшой вес этих летательных

аппаратов позволяет им сравнительно легко набирать высоту в восходящих потоках.

Для получения данных о ходе полёта БПЛА оснащаются пиродатчиками, позволяющими определить расположение аппарата относительно горизонта, GPS-приёмником, определяющим координаты, высоту и скорость, датчиком статического давления, а также, зачастую – акселерометром и гироскопами.

Автономное управление полётом БПЛА осуществляется при помощи автопилота. В настоящее время массово производятся и доступны в свободной продаже ряд автопилотных систем. В то же время существует ряд частных проектов, в которых силами энтузиастов создаются открытые автопилотные системы. Аппаратные схемы этих систем распространяются свободно по принципу OSHW (*Open Source Hardware*), компоненты, из которых они собираются, широко распространены, а в случае их недоступности, могут быть легко заменены аналогами. Вероятно, наиболее популярными и наиболее активно развивающимися на сегодняшний день являются проекты Pararazzi и Ardupilot.

Важно отметить, что большинство подобных систем ориентированы на решение простейших навигационных задач, которые они способны решать весьма эффективно и в режиме реального времени. Фактически, это задача следования по маршруту, заданному набором путевых точек, порой с выполнением простейших задач – таких, как, например, фотографирование, – при достижении некоторых точек. Однако, будучи построены на основе простейших микроконтроллеров, эти системы не имеют полноценной операционной системы, что затрудняет реализацию более сложной логики поведения. Этот недостаток остро ощущается, к примеру, в задачах, в которых требуется применение компьютерного зрения. Реализация мультиагентной логики, лежащей в основе системы, предлагаемой в настоящей работе, на базе контроллера автопилота также значительно затруднена.

Для преодоления ограничений простейших автопилотных систем в различных проектах используются два основных подхода. Оба предполагают оснащение системы более сложным вычислительным устройством – микрокомпьюте-

ром, на котором выполняется полноценная операционная система. При этом первый подход переносит всю навигационную логику в ПО, выполняющееся на микрокомпьютере, используя плату автопилота лишь для управления сервоприводами и электромотором, в то время как второй подход полностью использует возможности платы автопилота для простейшей навигации, а микрокомпьютер применяет лишь для решения более сложных задач. В большинстве случаев использование второго решения более оправдано, поскольку оно позволяет изолировать программу, управляющую жизненно важными системами БПЛА и которая должна выполняться в режиме реального времени, в отдельный модуль, что обеспечивает большую надёжность всей системы.

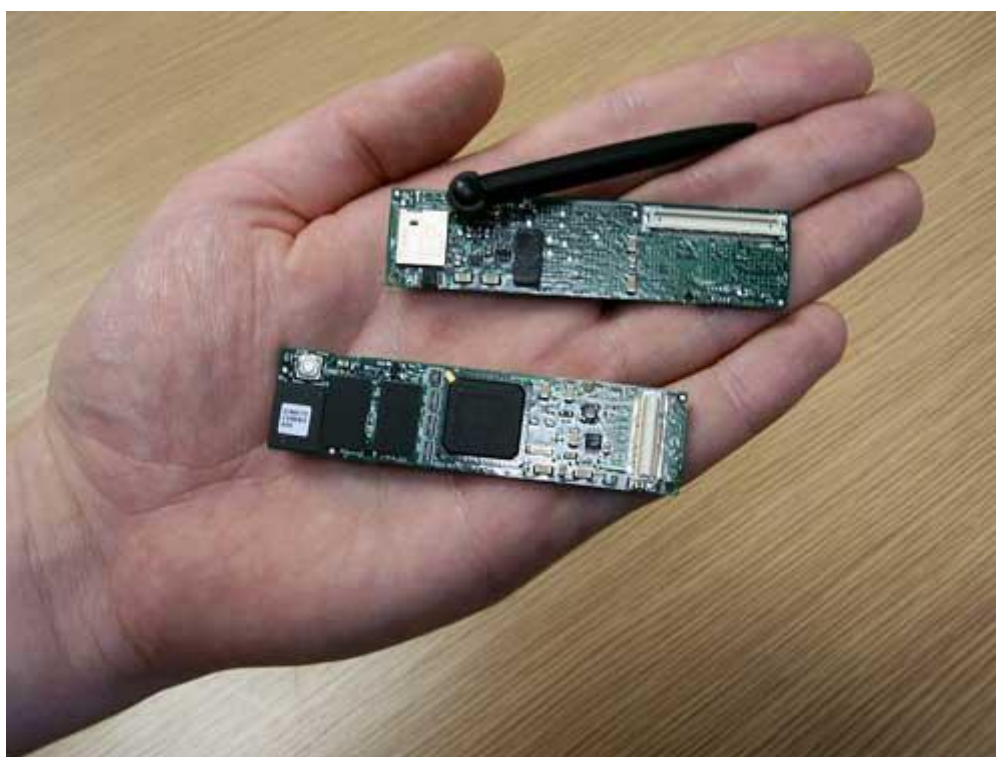


Рис. 2. Микрокомпьютер Gumstix

На сегодняшний день массово производится большое число готовых к использованию микрокомпьютеров типа SoC (System-on-Chip) – таких, как Gumstix (фотография которого приведена на Рис.2), или BeagleBoard. В основе этих систем лежит чипсет OMAP, часто используемый в современных смартфонах. В этих системах на компактной плате собран полнофункциональный компьютер – обычно, на базе архитектуры ARM. Чаще всего такие микрокомпьютеры работают под управлением ОС Linux.

3.2 Оборудование наземной станции контроля полёта. Используемые интерфейсы связи

Как было упомянуто выше, автопилот позволяет БПЛА действовать в автономном режиме, однако в ряде задач требуется взаимодействие БПЛА с наземной базовой станцией, или с другими БПЛА при полёте в группе. Это делает возможным обмен данными телеметрии в режиме реального времени между летательным аппаратом и базовой станцией или между одним летательным аппаратом и другими летательными аппаратами группы, динамическое переопределение задачи во время полёта (например, задание новых путевых точек).

В современных БПЛА для передачи данных используются несколько видов радиоканалов. Для обмена данными телеметрии и отправки команд с земли, для которых время доставки не является критичным, часто используется медленный цифровой канал. В случае необходимости передачи потокового видео, используется аналоговый видеосигнал. Для обеспечения ручного пилотирования – например, при посадке, – в беспилотные самолёты устанавливается также приёмник пульсового радиосигнала.

Следует отметить, однако, что использование описанных интерфейсов радиосвязи сопряжено с рядом проблем. Прежде всего, как уже было упомянуто, скорость передачи данных по этим каналам сильно ограничена. Энергопотребление передатчиков весьма высоко, что сокращает время полёта БПЛА. Наконец, в случае применения БПЛА гражданскими организациями, часто возникает проблема лицензирования радиочастот, что сильно ограничивает диапазон допустимых частот и мощность передатчика. В связи с этим в настоящее время в ряде проектов предпринимаются попытки дополнить беспилотные системы иными устройствами связи. Таким устройством, является, например, сотовый модем, способный обеспечивать достаточно стабильный канал цифровой связи. Зона покрытия сотовых сетей увеличивается с каждым годом, что делает вполне возможным использование сотового интернета для передачи данных телеметрии и команд при полёте над населённой местностью. В задачах, в кото-

рых можно обеспечить периодическое сближение БПЛА группы и/или БПЛА и наземной станции, для передачи больших объёмов данных можно использовать также канал, работающий по одному из стандартов семейства 802.11 (WiFi). Следует отметить, что некоторые модели микрокомпьютера Gumstix оборудованы встроенным WiFi-приёмником, а остальные обыкновенно имеют USB-порты. Принимая во внимание, что на этих устройствах исполняется операционная система Linux, к ним могут быть с лёгкостью подключены почти любые потребительские устройства связи с USB-интерфейсом.

Предлагаемая нами система не ставит особых требований к оборудованию базовой станции. Единственной обязательной функциональностью базовой станции является, пожалуй, возможность соединения (проводного или беспроводного) с автопилотом и бортовым компьютером для передполётной установки параметров задания. Для этой цели могут быть использованы USB-порты устройств, однако в том случае, когда необходимо проинициализировать несколько БПЛА, можно использовать также Bluetooth или WiFi-интерфейс. Часто, однако, базовая станция оснащается также устройствами беспроводной связи – такими, как радиомодем, – для обмена данными с БПЛА во время полёта. Типичное устройство базовой станции - ноутбук с ПО, позволяющим строить маршрут полёта и сохранять его в автопилот, и радиомодем. Такая конфигурация используется, например, в проекте Paragazzi. ПО базовой станции распространяется в рамках данного проекта, как образ загрузочного компакт-диска на основе дистрибутива ОС Ubuntu Linux.

Глава 4

Технология разработки мультиагентного ПО для управления группой БПЛА

4.1 Создание МАС с использованием фреймворка JADE

В настоящей работе для реализации мультиагентного взаимодействия предлагается использовать фреймворк JADE (*Java Agent Development Framework*), который является программной средой для разработки МАС, поддерживающей стандарты FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*). В задачи агентной платформы входит прежде всего поддержание жизненного цикла агента и эффективной передачи сообщений между участниками.

Основной программной единицей внутри платформы является агент. С точки зрения платформы, агент JADE – обычный экземпляр определяемого пользователем Java-класса, который расширяет класс *Agent*, реализованный в платформе. Из этого следует, что базовый набор действий агента, необходимый для функционирования внутри платформы определен изначально. При этом из каждого агента доступен общий функционал платформы: прием-передача со-

общений и стандартные протоколы взаимодействий; планировщик поведений и набор стандартных поведений; менеджер управления жизненным циклом агента. Разработчику необходимо лишь реализовать «интеллект» агента, который, анализируя входные данные, выбирает выходное воздействие.

Для отработки реакции на события агент имеет поведения. В рамках этой модели возможна реализация как последовательного выполнения поведений из пула, так и выполнение нескольких поведений одновременно. Поведения, как и сам агент, являются Java-классами, следовательно, в процессе разработки программист имеет возможность комбинировать существующие типы поведений и наполнять их необходимым функционалом. Можно выделить простые и сложные поведения. К первой группе относятся единожды выполняемое и циклическое поведения, а ко второй — триггеры, последовательные и параллельные поведения. На Рис.3 проиллюстрирована архитектура агента.

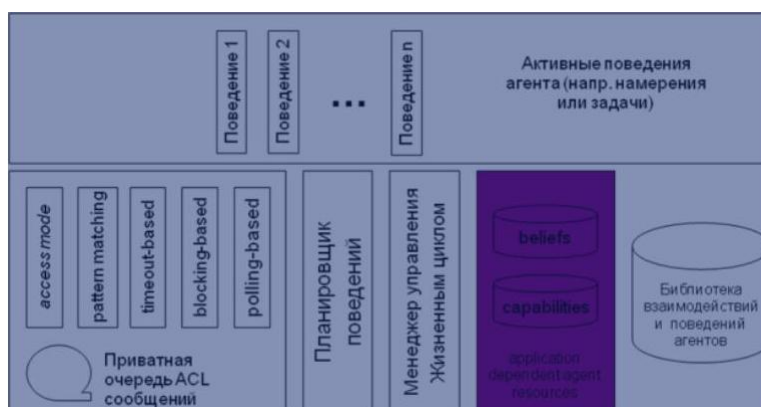


Рис. 3. Архитектура агента в фреймворке JADE

Платформа JADE состоит из системы контейнеров, распределенных в системе. Обычно на каждом хосте находится по одному контейнеру. Агенты существуют внутри контейнеров, в которых обеспечиваются базовые системные сервисы. В системе может быть только один главный контейнер, который представляет собой точку начальной загрузки платформы. Главный контейнер создается первым, все созданные позже контейнеры должны быть зарегистрированы в главном контейнере. Он содержит таблицу контейнеров (*CT – container table*), в которой хранятся ссылки на объекты и транспортные адреса всех контейнеров, входящих в состав платформы. На Рис.4 показаны отношения между

основными архитектурными элементами.

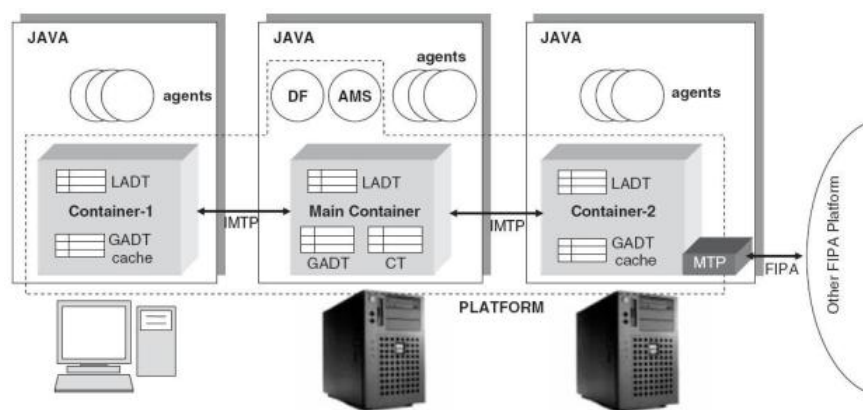


Рис. 2. Основные элементы архитектуры JADE и отношения между ними

Агенты в JADE общаются при помощи обмена сообщениями. Сервис обмена сообщениями – одна из основополагающих частей архитектуры платформы. Он использует асинхронный принцип передачи сообщений. Каждый агент имеет свой «почтовый ящик» - очередь входящих сообщений, в которую помещаются все направленные агенту сообщения. В тот момент, когда сообщение помещается в очередь входящих сообщений, агент оповещается об этом. В связи с тем, что агенты, обменивающиеся сообщениями, могут находиться как в одном, так и в разных контейнерах, JADE использует два типа протоколов: MTP (*Message Transport Protocol*) и IMTP (*Internal Message Transport Protocol*). В том случае, когда агенты находятся в разных контейнерах, используется RMI (*Java Remote Method Invocation*). В случае межплатформенного сценария взаимодействие осуществляется по ACC (*Agent Communication Channel*). Контейнеры могут быть запущены с различными типами MTP, при этом ACC должен обеспечивать взаимодействие между ними. На Рис. 5 представлены компоненты сервиса обмена сообщениями в JADE.

Завершая краткий обзор платформы JADE, можно выделить основные ее преимущества в сравнении с аналогичными решениями: она полностью реализует стандарты FIPA, что вносит ясность в процесс разработки и понимания работы приложения; расширяется и интегрируется со сторонними системами; легко адаптируется к оборудованию, на котором она будет развернута. JADE

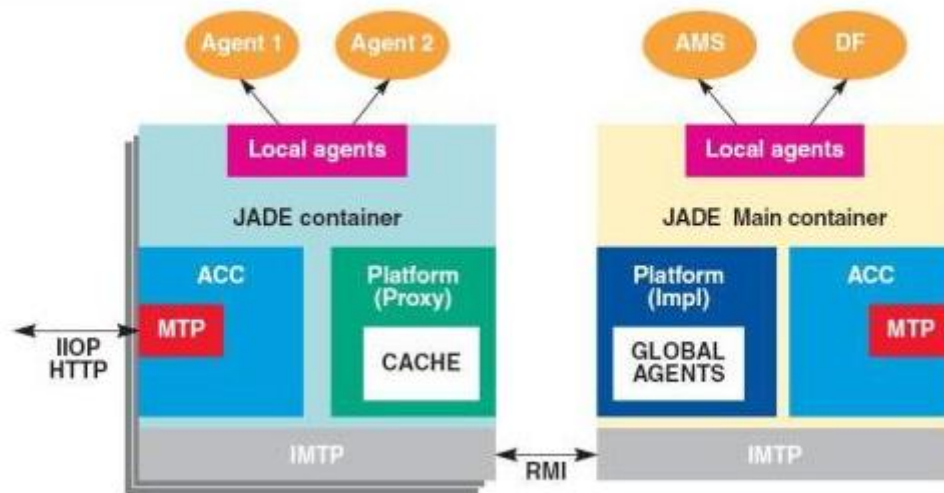


Рис. 5. Компоненты сервиса обмена сообщениями в JADE

обеспечивает однотипный набор API, независимый от используемой архитектуры системы и версии JAVA. Более того JADE обеспечивает одинаковый набор API для J2EE, J2SE и J2ME. Среда выполнения указывается на этапе развертывания проекта, что дает особую гибкость при разработке приложений для мобильных и встроенных систем.

4.2 Многослойная система

Как было упомянуто ранее, мультиагентные системы могут применяться для управления группами БПЛА в решении большого разнообразия задач. Среди них – аэрофотосъёмка, патрулирование территории, наблюдение за объектами и многое другое. Системы, созданные для каждой из этих задач, достаточно сильно различаются, но тем не менее, значительная часть компонент уже созданного комплекса может быть переиспользована при построении системы для решения иной задачи. Для того, чтоб систематизировать архитектуру сложных мультиагентных систем для координации групп БПЛА и облегчить переиспользование отдельных компонент, может быть использована трёхслойная модель, которую мы опишем далее.

Верхний слой, определяющий предназначение системы – это спецификация

задачи, выполняемой группой БПЛА. С этим слоем связан первый этап технологического процесса, который мы предлагаем применить для создания подобных систем. На данном этапе производится подробный анализ задачи и выделяются параметры, определяющие её цель и сценарий выполнения. Приведём несколько простейших примеров: в системе, управляющей полётом группы БПЛА по маршруту, в качестве таких параметров можно выделить путевые точки маршрута, строй, которого летательные аппараты придерживаются в полёте; в задаче аэрофотосъёмки большой территории – координаты этой территории, высоту проведения съёмки.

Верхний слой системы определяет язык, при помощи которого осуществляются постановка задачи для группы БПЛА и контроль за ходом её исполнения. Перенося данную архитектурную абстракцию на физическую беспилотную систему, можно, пусть и с некоторой долей неточности, сказать, что верхний слой соответствует интерфейсу оператора системы. Он позволяет запустить группу БПЛА, задав ей конкретные цели, контролировать их исполнение и менять их динамически по мере необходимости.

Промежуточный слой системы, – *middleware*, – представляет собой собственно мультиагентное ПО, в котором реализованы стратегии агентов. На этом уровне происходит взаимодействие между автономными сущностями. Получая при инициализации от верхнего слоя параметры задания, ПО промежуточного слоя формирует первоначальную полётную программу, выраженную в таких примитивах, как путевые точки, скорость, курс, высота, которые передаются на нижний слой системы. В ходе полёта приложение, выполняющееся на борту БПЛА получает данные измерений с датчиков самолёта и взаимодействует с другими сущностями, каковыми являются другие летательные аппараты и наземная станция управления. Следует отметить, что каждая из таких сущностей может быть представлена как одним, так и несколькими агентами. Реагируя на поступающие данные, промежуточное ПО может корректировать полётную программу. Параметры новой полётной программы передаются на нижний слой.

В технологическом процессе со средним слоем системы связан этап разра-

ботки групповой стратегии и её реализация в стратегиях агентов. В качестве основы для такой реализации мы предложили в данной работе программную среду на базе фреймворка JADE. Вслед за реализацией стратегии проводится её тестирование с использованием технологии моделирования. В рамках настоящей работы был реализован прототип приложения, моделирующего полёт беспилотного аппарата и его взаимодействие с другими летательными аппаратами и наземной станцией. В дальнейшем данный прототип может быть усовершенствован для тестирования мультиагентного ПО для любых групповых задач.

Как уже указывалось в предыдущей главе, общая модель не накладывает строгих ограничений на аппаратную архитектуру системы, однако в силу уже приведённых соображений, целесообразно выделить для приложения, отвечающего за промежуточный слой, отдельный вычислительный модуль. В настоящей работе мы рассматривали возможность использования для этой цели таких микрокомпьютеров, как Gumstix или BeagleBoard.

Нижний слой системы составляет автопилотный модуль, который отвечает за управления основными системами самолёта и низкоуровневую навигацию. Как уже упоминалось, в большинстве случаев в качестве такого модуля можно использовать уже существующие программно-аппаратные комплексы – такие, как Paparazzi и Ardupilot, – без существенных модификаций. Модуль автопилота подключается посредством USB- или UART-интерфейса к микрокомпьютеру, передаёт ему данные измерений с датчиков БПЛА и принимает от него новые полётные команды или путевые точки.

Описанная многослойная модель обладает рядом существенных достоинств. Приведём некоторые из них. Прежде всего, разбиение системы на три чётко разграниченных модуля облегчает переиспользование отдельных модулей. Появляется возможность изменить реализацию отдельного слоя вне зависимости от реализации других слоёв. Выделение ПО агентов в отдельный слой делает возможным модульное тестирование, когда другие слои системы симулируются. Аппаратное же разделение среднего и нижнего слоя, контролирующего жизненно важные системы летательного аппарата, повышает надёжность си-

стемы, поскольку гарантирует, что сложная логика поведения и вычисления с ней связанные, не приведут к сбою автопилотной системы. Наконец, выделение верхнего слоя упрощает взаимодействие оператора с системой и контроль за ходом выполнения задания.

Глава 5

Решение задачи

максимизации времени

полёта группы БПЛА

Как уже было упомянуто выше, в настоящее время широко изучается возможность использования энергии восходящих потоков воздуха для максимизации времени полёта БПЛА в автономном режиме. Восходящие потоки, или термики, уже давно используются в планеризме, где они позволяют планёру оставаться в воздухе. В соревнованиях на продолжительность полёта лёгкие радиоуправляемые планёры достигали рекордной продолжительности полёта в более чем 10 часов. При использовании энергии термиков время полёта планера ограничено фактически только продолжительностью светлого времени суток — времени, когда поверхность земли нагревается солнцем и над ней образуются термики.

В экспериментах по использованию термиков в автономном (управляемым автопилотом) полёте БПЛА, проводившихся в последнее время — в основном, американскими исследователями, — были достигнуты хоть и более скромные, но весьма обнадеживающие результаты. Так, например, в эксперименте, проводившимся Эдвардсом [4] планёр находился в воздухе 98 минут за счет исполь-

зования восходящих воздушных потоков. При этом 79 % времени полёта БПЛА удавалось следовать заданному курсу и лишь 21 % времени уходило на поиск термиков. Эти результаты доказывают, что даровая энергия термиков может успешно использоваться БПЛА в режиме автономного полёта.

Принцип действия автопилота БПЛА, способного использовать энергию термиков, основан на следующей простой стратегии: БПЛА летит по заданному курсу, при этом посредством вариометра или устройства спутниковой навигации им измеряется скорость изменения высоты. Вхождение в термик сопровождается набором высоты, что регистрируется этими приборами, и автопилот БПЛА начинает процедуру центрирования в термике. Для наиболее эффективного набора высоты в термике, летательный аппарат должен двигаться по спиралевидной траектории, центром которой является центр термика, при этом должен быть учтён дрейф термика со временем, обусловленный горизонтальным ветром и некоторыми другими факторами; нахождение этой оптимальной траектории является задачей центрирования.

В основе предлагаемого в настоящей работе решения для максимизации времени полёта группы БПЛА, лежит простое интуитивное соображение, что вероятность обнаружения термика одним летательным аппаратом существенно ниже, чем вероятность его обнаружения группой. Справедливость этого соображения очевидна из геометрических соображений, если предположить, что летательные аппараты движутся по различным курсам, удалённым друг от друга на существенное расстояние. Если одновременно с этим предположить также, что среднее расстояние между аппаратами во время полёта достаточно мало, то естественным образом вытекает групповая стратегия, описанная в Алгоритме 1.

Некоторого пояснения требует ветвление на восьмой строке данного алгоритма. Для его выполнения необходим некий критерий, который позволял бы оценить выигрыш от использования энергии термика и энергетические затраты на полёт до термика и обратно. В действительности эти два параметра можно оценить, используя простой подход. Известно, что высота термиков в пределах

Алгоритм 1 Алгоритм взаимодействия БПЛА в группе

- 1: **if** Если зафиксирована положительная вертикальная скорость **then**
 - 2: запустить процедуру центрирования
 - 3: разослать широковещательное сообщение другим БПЛА с текущими координатами и оценкой направления и скорости дрейфа
 - 4: набрать высоту, двигаясь внутри термика
 - 5: продолжить полёт по маршруту
 - 6: **else**
 - 7: **if** получено сообщение об обнаружении термика другим БПЛА группы **then**
 - 8: **if** ожидаемый выигрыш в высоте от использования энергии термика превышает энергетические затраты на полёт до него и возвращение на маршрут **then**
 - 9: лететь в точку, где был обнаружен термик
 - 10: выполнить процедуру центрирования
 - 11: продолжить полёт по маршруту
 - 12: **else**
 - 13: продолжить полёт по маршруту
 - 14: **end if**
 - 15: **end if**
 - 16: **else**
 - 17: следовать по маршруту
 - 18: **end if**
-

небольшой территории с равными метеоусловиями, приблизительно одинакова. Разность этой высоты и текущей высоты БПЛА — это примерно та высота, которую БПЛА может набрать в термике. С другой стороны, известен также темп снижения летательного аппарата в метрах высоты на метр пройденного пути при планировании с выключенным двигателем. Зная расстояние до термика, несложно оценить высоту, которую БПЛА потеряет в полёте к термику и при возвращении на маршрут. Используя эти понятия, можно дать формальное определение критерию, который проверяется на шаге 3.1:

$$(a_{th} - a_{cur}) - ds > 0$$

В этом неравенстве a_{th} — высота термика, a_{cur} — текущая высота БПЛА, s — темп потери высоты (в метрах высоты на метр горизонтального полёта), а d — отклонение от курса, сопряжённое с использованием термика, т.е. расстояние, пройденное в полёте к термику и при возвращении на маршрут. Этот последний показатель определяется той задачей, которая выполняется группой БПЛА.

Описанная стратегия может быть применена для максимизации времени полёта в ряде различных задач, для решения которых используется группа БПЛА, среди которых патрулирование местности, аэрофотосъёмка (или — в более широком смысле — разведка) обширной территории, слежение за наземным стационарным или движущимся объектом. Кроме того, данная стратегия естественным образом подсказывает простое, пусть и несколько парадоксальное использование: предположим, что ёмкость аккумулятора БПЛА не позволяет ему преодолеть некий маршрут. В то же время, при использовании группы БПЛА и применении предложенной нами стратегии, задача становится выполнимой.

Глава 6

Заключение

В настоящей работе была предложена технология, которая может быть использована в создании автономных беспилотных систем, где в качестве автономной тактической единицы выступает группа БПЛА.

В рамках работы был проведён обзор существующих на сегодняшний день автопилотных технологий для малых и сверхмалых БПЛА, а также обзор новейших исследований, посвящённых использованию многоагентного подхода для создания автономных, самоуправляемых групп летательных аппаратов.

Была описана трёхслойная архитектура системы управления группой БПЛА, которая обеспечивает модулярность системы и облегчает переиспользование уже созданных компонент для построения новых систем, решающих иные групповые задачи. На основе мультиагентного фреймворка JADE нами была создана программная среда, которая может быть использована для создания мультиагентного ПО, составляющего промежуточный, координирующий слой модели.

В данной работе были также рассмотрены аппаратные технологии, применяющиеся на сегодняшний день в автопилотируемых беспилотных устройствах. На основании рассмотренных технологий нами была предложена аппаратная конфигурация, которая может быть применена совместно с описанной логической архитектурой для создания мультиагентных систем, управляющих группой БПЛА. Была рассмотрена возможность использования в подобных систе-

мах новых интерфейсов обмена данными между элементами системы, которые могут прийти на замену распространённым на сегодняшний день радиомодемам.

Использование предлагаемого нами подхода было продемонстрировано на примере задачи о максимизации времени полёта группы БПЛА с использованием энергии термиков. Были изучены существующие работы по использованию даровой энергии восходящих потоков в режиме автоматического полёта одиночного БПЛА; на их основании была разработана новая групповая стратегия, использующая преимущества группы летательных аппаратов при поиске восходящих потоков и увеличивающая, таким образом, среднюю продолжительность полёта аппарата в группе за счёт более эффективного поиска. Данная стратегия была реализована с применением предложенными нами технологии и прототипа программной среды.. Для тестирования стратегии был реализован симулятор, воспроизводящий условия полёта БПЛА над территорией с термиками и взаимодействие с автопилотной системой летательного аппарата.

Проведённое моделирование показало значительный выигрыш в энергосбережении при использовании групповой стратегии. Несмотря на свою простоту, этот пример наглядно демонстрирует, что в некоторых задачах использование групповой стратегии может дать существенные преимущества. Представленная нами реализация данного метода для простейшего сценария полёта по заранее заданному маршруту может быть в дальнейшем расширена для использования в более сложных сценариях.

Литература

1. *Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И, Граничина Н.О.,* Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов // Стохастическая оптимизация в информатике, СПбГУ, 2009, с. 157–166.
2. *Allen M. J.,* Autonomous soaring for improved endurance of a small uninhabited air vehicle // AIAA 2005-1025, 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 10-13 January, 2005.
3. *Allen M. J.,* Updraft model for development of autonomous soaring uninhabited air vehicles // AIAA 2006-1510, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 9-12 January, 2006.
4. *Daniel J. Edwards,* Implementation Details and Flight Test Results of an Autonomous Soaring Controller // North Carolina State University.
5. *Scerri P., Owens S., Glington R., Okamoto S., Sycara K.* Geolocation of RF Emitters by Many UAVs // In AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit, 2007.
6. *L. Marsh, G. Calbert, J. Tu, D. Gossink, H. Kwok* Multi-Agent UAV Path Planning // MODSIM05, 12-15 December, Melbourne.
7. *Scerri P., Pynadath D., Schurr N., Farinelli A., Gandhe S., Tambe, M.,* Team Oriented Programming and Proxy Agents: The Next Generation // In Proceedings of 1st international workshop on Programming Multiagent Systems, Springer, LNAI 3067, 2004.

8. *Kothari M., Postlethwaite I., Gu D.*, Multi-UAV path planning in obstacle rich environments using rapidly-exploring random trees // Proc. of the combined 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, December 16-18, 2009, Shanghai, P.R. China, pp. 3069–3074.
9. *Reichmann H.*, Cross-Country Soaring. — Minnesota: Soaring Society of America, Inc. 1978.