

Легкий беспилотный летательный аппарат для автономной группы¹

К. С. Амелин²

Санкт-Петербургский государственный университет

konstantinamelin@mail.ru

Рассматривается архитектура беспилотного летательного аппарата, техническое оснащение которого будет удовлетворять требованиям работы в автономной группе БПЛА. Описывается прототип созданного БПЛА.

Ключевые слова: Беспилотные летательные аппараты, навигационная система, автопилот, исполнительные механизмы, групповое взаимодействие.

1. Введение

Комплекс беспилотного летательного аппарата (БПЛА), как правило, состоит из одного БПЛА и базовой станции. К сожалению, в своей массе современная беспилотная техника не обладает автономностью (обычно дистанционно управляется оператором со специального пульта). Хотя есть и успешные разработки одиночных БПЛА, которые под управлением автопилота способны в автономном режиме облететь территорию по заданному маршруту, собирая ту или иную информацию или выполняя другие задания. Анализ большинства задач решаемых с использованием одиночных аппаратов показывает, что они могут более эффективно решаться группой. Использование группы БПЛА для решения общей задачи, как правило, реализуется работой несколько комплексов БПЛА, при этом каждый БПЛА общается только со своей базовой станцией [1], а они в свою очередь связаны с общим сервером. Существует большое количество прототипов и летающих БПЛА. В большей степени это летательные аппараты, применяемые в военных целях. Такие модели оснащаются помимо стандартного набора аппаратуры для БПЛА различными видами вооружения, поисковыми системами высочайшего класса, черными ящиками и т. п. Большинство

¹Работа выполнена при частичной финансовой поддержке ФЦП “Кадры” (госконтракт №16.740.11.0042 от 01.09.2010).

²©К. С. Амелин, 2010

практически используемых комплексов довольно большие по размерам (в размахе крыла самолет достигает порядка 6-7 м и в весе около 600 кг с полной загрузкой).

Возможности использования легких и маленьких самолетов ограничиваются сравнительно меньшим ресурсом, но за счет группового использования этот недостаток может быть скомпенсирован [2]. Использование легких и гораздо более дешевых аппаратов позволяет надеяться на возможность их более широкого распространения. Кроме стоимости у группы эффективно взаимодействующих легких и маленьких самолетов появляются дополнительные полезные свойства:

- более эффективное решение задач поиска, исследования труднодоступных или опасных местностей, военной разведки, геологоразведки, метрологии и т. п. (любые задачи, решаемые одним БПЛА, решаются более эффективно группой);
- большая вероятность выполнения задачи;
- выигрыш во времени (главное условие для задачи поиска потерявшихся людей);
- возможность одновременного обследования большей территории;
- возможность корректировки плана и выбора оптимального маршрута, основываясь на данных соседних БПЛА, с целью минимизации дублирования функций;
- взаимодействие между БПЛА помогает оптимизировать маршрут полета, основываясь на уже имеющихся данных о метеорологических условиях с других БПЛА;
- возможность создания общей объемной “картины мира”;
- возможность реализовывать более сложные и адаптивные стратегии;
- возможность постановки разных задач для разных участников группы.

Для крупных беспилотных летательных аппаратах в ближайшее время также станут актуальными проблемы группового взаимодействия, при этом “отработку” возможных сценариев этого взаимодействия удобнее и дешевле провести на малых и легких самолетах.

Существенным преимуществом группового использования БПЛА с автономной системой связи между ними и бортовыми микрокомпьютерами является возможность организации адаптивного мультиагентного взаимодействия для более эффективного решения

как общей задачи, так и отдельных задач каждого БПЛА.

В этой статье будет рассмотрена архитектура легкого БПЛА, который способен работать в группе себе подобных БПЛА и соответствует техническим требованиям для взаимодействия не только с базовой станцией, но и напрямую с другими членами группы, находящимися вблизи от него.

Обозначим компоненты такого БПЛА (рис. 1):

- корпус модели,
- исполнительные механизмы,
- дополнительное оборудование (видео-, фото-камера и т. п.),
- система навигации,
- автопилот,
- бортовой микрокомпьютер.



Рис. 1: Блок-схема БПЛА.

2. Корпус БПЛА

Корпус БПЛА определяет его функциональность. Для создания нашего легкого БПЛА мы использовали модель планера “PAPRIKA”,

рассчитанную на эксплуатацию с бесколлекторным электродвигателем. “РАПРИКА” — самолет типа планер с размахом крыла немногим более двух метров [3]. Съемное крыло можно разделить на две части, благодаря чему довольно большая модель не занимает много места при хранении и транспортировке. Каркас крыла планера сделан из самого легкого в мире дерева — бальза. Крыло обтянуто тонкой полимерной пленкой для лучшей аэродинамики и прочности. Небольшая толщина профиля крыла по отношению к хорде, которая характерна восьмипроцентному профилю крыла МН32, позволяет эксплуатировать планер в качестве скоростной модели, а сильно развитый отклоняемый закрылок способен обеспечить плавный размеренный полет на небольших скоростях. Взлет модели осуществляется с руки или с катапульты. Посадка, для которой не потребуется большая площадка, осуществляется пилотом, который перехватывает управление в зоне его видимости. Для увеличения маневренности и уменьшения скорости полета (около 40 км/ч в штиль) закрылки могут работать совместно с элеронами, что позволит изменить профиль всей рабочей плоскости крыла. Хвостовое оперение, изготовленное по технологии крыла, имеет минимальное аэродинамическое сопротивление. V-образная форма уменьшает риск повреждения хвоста при приземлении. Фюзеляж планера имеет цилиндрическую форму, диаметр которой уменьшается от носовой части к хвосту. Он сделан из стекловолокна и армирован углепластиком для усиления конструкции. Фюзеляж покрашен и отполирован, для улучшения аэродинамики.

Технические характеристики планера:

- длина, мм: 1200;
- размах крыла, мм: 2006;
- площадь крыла, дм²: 35,8;
- максимальный полетный вес, г.: 2000-2100;
- полезная нагрузка, г.: 600.

3. Исполнительные механизмы

Управляющие воздействия на БПЛА осуществляются через исполнительные механизмы, представляющие собой шесть микро сервомеханизмов и силовую мотоустановку [3]. Сервомеханизмы используются для управления рулями, два — на V-образное хвостовое оперение, четыре — в крыле, по одной на каждый закрылок и эле-

рон. Они обладают металлическими редукторами и имеют размеры 23,6 мм x 11,6 мм x 24 мм, мощность 2,2 кг/см, вес 11,9 г и скорость отработки 0,1 сек при повороте на 60 градусов. Такие характеристики обеспечивают надежность, быстроту и точность в управлении каждым рулем. Силовая мотоустановка состоит из бесколлекторного двигателя типа 3013/18, который способен развивать тягу до 2,2 кг на земле, и регулятора оборотов двигателя с рабочим током до 45 А. Воздушный винт диаметром 254 мм и шагом 6 складывается при планировании для уменьшения сопротивления воздуха и шума (при движении с выключенным двигателем). Аккумуляторная батарея для мотоустановки — типа Li-Po емкостью 2800 мА/ч и напряжением 11,1 В [2].

К исполнительным механизмам также можно отнести и дополнительное оборудование. Основным дополнительным оборудованием являются видео- и фото-камеры [4]. Как правило, используют либо передающую в реальном времени видеокамеру, при полетах на расстоянии видимости радиосигнала, либо фотокамеру с записью фотографий на flash носитель при полетах на дальнее расстояние, где связь с оператором теряется. Мы применяем камеру Panasonic KX-131G Color CCD Board Camera с размерами 22 x 26 x 28 мм, весом 22 г, размером объектива 3,6 мм и автоматическим автофокусом. Мы предполагаем, что если использовать видеокамеру совместно с фотокамерой, то мы получим и картинку в реальном времени и хорошие фотографии высокого разрешения.

4. Система навигации

Одним из ключевых элементов управления БПЛА является система навигации, которая служит для измерений состояний системы в определенные моменты времени [5] (координат местоположения, скорости, высоты, вертикальной скорости, углов ориентации, а также угловых скоростей и ускорений). В системе навигации БПЛА используется комплекс из спутниковой системы и инерциальной.

Спутниковая система работает посредством навигационного оборудования GPS (возможно использование и системы ГЛОНАСС). Она позволяет определить координаты, скорость и высоту движения БПЛА, получая данные со спутников. Но приемник не всегда видит спутники. Использование инерциальной системы позволяет продолжать движение БПЛА при отсутствии сигнала со спутни-

ка, а также в совокупности с системой GPS увеличивает точность измерения.

В инерциальную систему входят микроконтроллер и комплекс датчиков, состоящий из:

- триады инерциальных датчиков (пьезогироскопы по трем осям);
- трехосного магнитометра (определение азимута движения);
- трубки Прандтля (с ее помощью определяется воздушная скорость и высота полета по измерениям динамического и статического давлений).

Микроконтроллер обрабатывает данные, полученные с датчиков, преобразует их и отправляет в микрокомпьютер БПЛА. Выходные данные микроконтроллера инерционной системы предоставляются в виде: углов Эйлера, матрицы вращения, угловой скорости, ускорения и вектора угловой скорости, температуры воздуха, давления. Все эти данные помогают микрокомпьютеру ориентироваться в пространстве при отсутствии сигнала GPS или уточнять данные полученные со спутников при совместной работе инерциальной системы и GPS.

В нашем БПЛА мы используем GPS модуль U-Box LEA-5E с частотой обновления данных 4 Hz и инерциальную систему ArduIMU, которая интегрируется с описанным далее автопилотом.

Достоинства используемого GPS модуля:

- малые размеры,
- поддержка пассивных и активных антенн,
- поддержка DGPS, WAAS, EGNOS и MSAS,
- собственный протокол общения UBX более информативный и эффективный, чем универсальный протокол NMEA.

5. Автопилот

Систему автопилота БПЛА можно разделить на три основных составляющих:

- датчики горизонта,
- головное устройство,
- дешифратор ШИМ (широкоимпульсного) сигнала.

Датчики горизонта — инфракрасные термодатчики для выравнивания в горизонт. При горизонтальном полете разница температур между двумя датчиками должна быть равна нулю, а при крене

или тангаже в 90 градусов должна быть максимальной. За счет разницы в температуре на датчиках рассчитываются углы крена и тангажа.

Для выравнивания в горизонт требуется минимум две пары датчиков для определения углов крена и тангажа (IR XY-датчики). Но такая система хорошо работает на территории с малоразвитым рельефом и при маломеняющихся климатических условиях. Поскольку выходной сигнал от каждой пары датчиков прямопропорционален характеристикам окружающей среды и обратнопропорционален рельефу местности, система состоящая только из XY-датчиков требует постоянной калибровки с поверхностью земли и не может точно определить углы крена и тангажа, т. к. ИК излучения постоянно меняются. Поэтому мы используем третью пару датчиков по вертикальной оси Z (IR Z-датчик). На этой паре датчиков постоянно отслеживается максимальная разница температур [6].

Головное устройство, как правило, содержит микроконтроллер, который с помощью различных входов и выходов считывает информацию с ИК датчиков, навигационного оборудования, отправляет управляющий сигнал на дешифратор ШИМ, и перепрошивается через СОМ порт. Микроконтроллер — система реального времени, которая собирает данные с подключенного к нему оборудования и выдает управляющее воздействие на исполнительные механизмы в виде ШИМ сигнала. В микроконтроллер зашивается программа управления БПЛА. Новые точки полета и данные навигации автопилот получает от бортового компьютера.

Также автопилотом может осуществляться управление дополнительным оборудованием, например, фотографирование местности в заданной точке.

Дешифратор ШИМ сигнала разбивает поступивший управляющий сигнал от микроконтроллера на отдельные сегменты управления и передает их на исполнительные механизмы, которым этот сигнал предназначен.

Мы используем автопилот фирмы Parparazzi Tiny V.2.1 [6]. Он построен на основе микроконтроллера Philips LPC2148 ARM7. Питание автопилота осуществляется от отдельного аккумулятора напряжением 3,3 V, имеет дешифратор ШИМ сигнала на 8 выходов, СОМ порт, вход для GPS, входы аналогового сигнала для снятия показаний с ИК датчиков, 512 KB Flash ROM, 40 KB RAM и способен работать с тактовой частотой 60 MHz.

Для уточнения полученных данных в программе автопилота используются специальные алгоритмы, в частности, фильтр Калмана (см. [7]). За обработку информации более высокого уровня в нашем проекте отвечает бортовой микрокомпьютер.

6. Бортовой микрокомпьютер

Бортовой микрокомпьютер — головное устройство системы управления БПЛА. Его основная цель — выполнить поставленную ему задачу с наименьшими затратами времени и ресурсов [7]. Для этого он выполняет пять основных функций:

- генерация обновлений к программе полета для автопилота,
- обработка данных навигационного оборудования и телеметрии,
- работа с дополнительным оборудованием,
- общение с микрокомпьютерами других БПЛА, если работа ведется в группе.
- отправка данных на базовую станцию и получение от нее новых заданий.

С базовой станции микрокомпьютер получает общие задачи (начальное состояние, конечные точки, задача для группы и т. п.). При групповом полете общая задача разбивается на частные для каждого БПЛА. В процессе выполнения задачи микрокомпьютер осуществляет общение с другими членами группы, находящимися в радиусе действия радиосвязи. Взаимодействие в группе позволит группе БПЛА эффективнее выполнить общую задачу, а также избежать столкновений.

На основе полученных данных от базовой станции, с навигационного оборудования и при общении с другими БПЛА, микрокомпьютер может сгенерировать новую программу для автопилота, если старая не поддерживает нужных требований для выполнения общей задачи.

При пролете БПЛА в зоне связи с базовой станцией микрокомпьютер отправляет новые накопленные им данные и получает новые задания. При этом накопление данных происходит не только за счет собственных сенсоров и датчиков, но и при связи с другими БПЛА. Как говорилось выше, в микрокомпьютер закладывается отдельная для него задача и общая. В процессе общения микрокомпьютер накапливает информацию о выполнении общей задачи,

данные о выполнении своей частной задачи он получает сам, используя бортовые датчики.

Мы используем микрокомпьютер фирмы Gumstix — Gumstix Overo Air [8]. Размер этого микрокомпьютера: 17 мм x 58 мм x 4,2 мм. Он построен на основе процессора ARM Cortex-A8 с тактовой частотой 600 Mhz, имеет 256 MB памяти RAM и 256 MB встроенной памяти NAND Flash. Overo Air оснащен слотом для карты micro SD, 27-пиновым слотом для подключения микро видеокамеры и двумя 70-штырьковыми слотами для подключения к плате расширения. На Gumstix установлена операционная система Linux. Связь между двумя такими микрокомпьютерами осуществляется за счет встроенного радиоприемника на 2,4 GHz с протоколом общения 802.11 a/b/n (wi-fi). Связь с базовой станцией осуществляется за счет отдельного радиоканала или через GPRS по GSM модему. GSM модем легко интегрируется с микрокомпьютером, но для передачи данных пакеты желательно подвергать дополнительному сжатию.

Для настройки микрокомпьютера Gumstix мы используем плату расширения Gumstix Tobi, которая соединяется с Overo Air посредством двух 70-пиновых штеккеров AVX 5602 серии. Плата расширения имеет выходы HDMI, USB, mini USB, USB OTG, audio вход и выход, USB Console вход для настройки процессора в Overo Air. За счет этой платы расширения мы можем создавать свои приложения непосредственно в ОС микрокомпьютера. Для обмена данными бортового компьютера Gumstix с автопилотом Paragazzi мы используем USB порт.

7. Будущие планы

В ближайших планах по созданию БПЛА для группового взаимодействия — испытание созданного прототипа в полете. При этом прототип должен будет общаться с базовой станцией, на которой будет смоделирована работа еще одного БПЛА. Для отработки группового взаимодействия прототип будет параллельно обмениваться информацией с базовой станцией и с виртуальной смоделированной агентом. Далее — групповой полет двух БПЛА.

Т.к. связь между агентами и базовой станцией может не быть постоянной, то одной из главных задач в ближайшее время мы ставим разработку и адаптацию алгоритмов конвертирования, сжатия и отправки данных, полученных с датчиков БПЛА. Также мы пла-

нируем испробовать систему с видео- и фото-камерой на борту. Параллельно в нашей группе ведутся работы по аппаратному сжатию видеоинформации на новых принципах Compressive Sensing [9].

В перспективных планах — апробация на практике возможностей группового взаимодействия для использования энергии восходящих термических потоков [10].

Список литературы

- [1] Официальный сайт по беспилотным летательным аппаратам. <http://bp-la.ru>.
- [2] *Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О.* Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов // Стохастическая оптимизация в информатике. Вып. 5. 2009. С. 157–166.
- [3] Официальный сайт по радиоуправляемым моделям. <http://rcdesign.ru>.
- [4] *Ростопчин В.В., Дмитриев М.Л.* Применение цифровых оптических систем для беспилотных летательных аппаратов. ЦНИИ АРКС. 16.06.2005 г., AVIA.ru.
- [5] *Салычев О.С.* Автопилот БПЛА с инерциальной интегрированной системой — основа безопасности эксплуатации беспилотных комплексов. 2008.
- [6] Официальный сайт Paparazzi. <http://paparazzi.enac.fr>.
- [7] *Haiyang Chao* Cooperative Remote Sensing And Actuation Using Networked Unmanned Vehicles. PhD thesis. Utah state university. 2010.
- [8] Официальный сайт Gumstix. <http://www.gumstix.net>.
- [9] *Граничин О.Н., Павленко Д.В.* Рандомизация получения данных и ℓ_1 -оптимизация (опознание со сжатием) (Обзор) // Автоматика и телемеханика. 2010. № 11.
- [10] *Antal C., Granichin O., Levi S.* Adaptive autonomous soaring of multiple UAVs using SPSA // In Proc. of the 49th IEEE Conference on Decision and Control, December 15-17, 2010, Atlanta, GA. USA.