Московский авиационный институт

(Национальный исследовательский университет)

Фак. №7 «Робототехнические и интеллектуальные системы»

Каф. №704 «Информационно-управляющие комплексы»

**Отчет по преддипломной практике**

**«Разработка алгоритмов, программно-математического и аппаратного обеспечения для управления группировкой БПЛА с использованием радиоканала»**

**Выполнил:**

**Ст. гр. 07-608 Мацепура А.М.**

**Научный руководитель:**

**доц. Холостов К.М.**

/дата/ /подпись/

**Москва**

**2014г.**

[1. Введение 4](#_Toc401301970)

[2. Назначение БПЛА в целях реализации различных задач 6](#_Toc401301971)

[2.1. Состав и классификация БПЛА 7](#_Toc401301972)

[2.2. Развитие технологий БПЛА 11](#_Toc401301973)

[2.3. Варианты управления БПЛА 13](#_Toc401301974)

[3. Системы и алгоритмы управления группой БПЛА 15](#_Toc401301975)

[3.1. Системы на основе «роевого интеллекта» 18](#_Toc401301976)

[3.2. Прикладные многоагентные системы управления 20](#_Toc401301977)

[3.3. Адаптивное управление автономной группой БПЛА 21](#_Toc401301978)

[3.4. Решение задачи об обнаружении источников радиосигнала группой БПЛА 23](#_Toc401301979)

[4. Разработка алгоритма группового взаимодействия с использованием радиоканала 25](#_Toc401301980)

[4.1. Организация управляющего канала «пункт управления – группа БПЛА» 25](#_Toc401301981)

[4.2. Организация взаимодействия внутри группы БПЛА 29](#_Toc401301982)

[4.3. Работа внутригрупповой системы взаимодействия совместно с внешним каналом управления 29](#_Toc401301983)

[4.4. Блок-схема алгоритма взаимодействия 30](#_Toc401301984)

[4.5. Содержание и объем передаваемой информации 31](#_Toc401301985)

[*4.5.1.* *Информация при общении внутри сети* 32](#_Toc401301986)

[*4.5.2.* *Информация при общении с базовой станцией* 33](#_Toc401301987)

[4.6. Обеспечение контроля надежности и достоверности передаваемых сигналов управления 34](#_Toc401301988)

[4.7. Основные требования, предъявляемые модулям радиоканала 35](#_Toc401301989)

[5. Протокол взаимодействия на основе разработанного алгоритма 38](#_Toc401301990)

[5.1. Структура пакета 38](#_Toc401301991)

[6. Аппаратно-техническая реализация. Выбор элементной базы 39](#_Toc401301992)

[6.1. Выбор приемопередающего радиомодуля 39](#_Toc401301993)

[6.2. Выбор микроконтроллера 41](#_Toc401301994)

[*6.2.1.* *Назначение* 42](#_Toc401301995)

[*6.2.2.* *Процесс выбора* 44](#_Toc401301996)

[*6.2.3.* *Описание Atmega328P-PU* 44](#_Toc401301997)

[7. Разработка функциональной и принципиальной схем системы взаимодействия и управления группой БПЛА с использованием радиоканала 46](#_Toc401301998)

[7.1. Функциональная схема модуля на борту БПЛА 46](#_Toc401301999)

[7.2. Функциональная схема устройства сопряжения с оборудованием пункта управления 47](#_Toc401302000)

[7.3. Принципиальная схема модуля на борту БПЛА 48](#_Toc401302001)

[7.4. Вариант конструктивного исполнения модуля на борту БПЛА 49](#_Toc401302002)

[8. Разработка программно-математического обеспечения 50](#_Toc401302003)

[8.1. ПМО устройства сопряжения с оборудованием пункта управления 50](#_Toc401302004)

[8.2. Программно-математическое обеспечение модуля на борту БПЛА 50](#_Toc401302005)

[8.3. Программно-математическое обеспечение ПЭВМ оператора 51](#_Toc401302006)

[Выводы о проделанной работе 52](#_Toc401302007)

[Направления дальнейшей работы 53](#_Toc401302008)

[Список использованных источников 54](#_Toc401302009)

# Введение

Успехи, достигнутые в разработке беспилотных летательных аппаратов, как военного, так и гражданского назначения, создают хорошие предпосылки для широкого круга их применения, в частности для исследования земной поверхности, в том числе зон стихийных бедствий, мест чрезвычайных ситуаций, для обнаружения очагов пожаров, для измерения метеорологических данных, радиационного фона и других факторов, а также для обеспечения телекоммуникаций, мониторинга трубопроводов и линий электропередач, патрулирования границ. Связано это с тем, что БПЛА гораздо дешевле пилотируемой авиации, более просты в обслуживании, их полет может быть намного продолжительнее, они также могут работать в темноте, в условиях плохой видимости, кроме того, они могу применяться в ситуациях, угрожающих жизни пилота.

Эффективность использования БПЛА значительно повышается при организации групповых полетов. Однако при этом возникает ряд сложных проблем, связанных с обеспечением управления полетом группы БПЛА. Под группой БПЛА обычно понимают некоторую совокупность летательных аппаратов, которые подчиняются определенным правилам сбора в группу, способны выдерживать свое место в строю на прямолинейных и криволинейных участках полета всей группы в целом, реагировать на изменения окружающей среды и взаимодействовать друг с другом.

В последнее время активно развиваются методы адаптивного и интеллектуального управления робототехническими системами, в которых все активнее развивается идея децентрализации, путем распределения между отдельными подсистемами задач обработки сенсорной информации, формирования моделей среды, операций коммуникаций, диагностики и т.д., позволяет существенно расширить сферу применения автономных комплексов и систем.

При этом на систему управления полетом группы БПЛА возлагается задача согласованного управления каждым из летательных аппаратов для решения единой целевой задачи, поставленной перед группой.

Для разработки мультиагентной адаптивной системы управления для группы БПЛА должны выполняться два основных требования:

1. На каждой модели должен быть небольшой, но мощный микрокомпьютер для работы в реальном времени как автопилот, а также для общения агентов между собой.
2. Необходимо организовать уверенную связь между агентами группы, например, с помощью радиоканала(-ов).

В настоящей работе рассматривается решение второго необходимого требования, а именно: реализация алгоритмов, программно-математического и аппаратного обеспечения для управления группой БПЛА при помощи радиоканала с учетом возможности автономного общения внутри группы.

# Назначение БПЛА в целях реализации различных задач

Три четверти века назад в Великобритании в воздух был поднят первый беспилотный радиоуправляемый самолет. С этого момента в большинстве стран не прекращались работы по разработке систем управления беспилотными летательными аппаратами.

В современном мире существует большое количество прототипов и летающих БПЛА. В большей степени это летательные аппараты, применяемые в военных целях.

Основными свойствами БПЛА самолетного и вертолетного типов, выгодно отличающими их от пилотируемых самолетов и вертолетов, являются:

* Более высокая выживаемость БПЛА в условиях противодействия средств ПВО противника вследствие их меньшей заметности во всех диапазонах радиоволн;
* Возможность их взлета практически при любом рельефе местности без проведения подготовительных инженерных работ;
* Способность пребывания в высоких степенях готовности практически неограниченное время;
* Более короткие сроки и меньшая стоимость обучения операторов наземных пунктов управления БПЛА по сравнению с подготовкой экипажей пилотируемых ЛА;
* Значительно меньшие стоимость (на один-два порядка в зависимости от целевого предназначения и параметров БПЛА) и сроки развертывания их серийного производства;
* Возможность выдачи информации потребителям практически в реальном масштабе времени;
* Способность функционировать в условиях высокого радиоактивного, химического и бактериологического заражения воздуха и местности, а также при неблагоприятных метеоусловиях;

На современном этапе развития БПЛА зарубежные военные специалисты планируют существенно расширить зону возможного применения БПЛА не только для решения задач разведки и наблюдения, но и для поражения наземных и воздушных целей, а также выполнения ряда задач боевого применения.

В частности проводятся эксперименты, связанные с разведкой погоды в районе боевых действий (сбор и передача данных о скорости ветра и атмосферном давлении), для чего применяются БПЛА, оборудованные специальной метеорологической аппаратурой. Кроме того, с использованием БПЛА изучается возможность выполнения лазерного подсвета наземных целей для применения высокоточного оружия (ВТО) наземного или воздушного базирования. При этом следует заметить, что основным видом БПЛА в настоящее время являются БПЛА самолетных схем.

Разработкой БПЛА вертолетного типа занимаются специалисты практически всех ведущих стран мира. Их основным заказчиком являются различные военные и гражданские специальные службы.

Управление такими БПЛА осуществляется в настоящее время по командам оператора или в полуавтоматическом режиме с использованием навигации по опорным точкам.

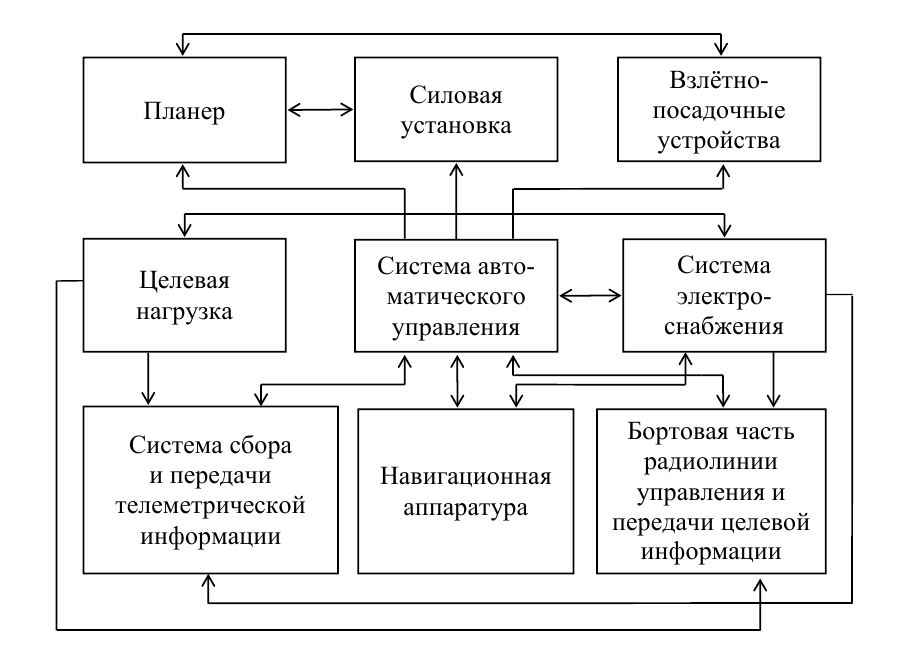
Главное преимущество БПЛА вертолетного типа состоит в вертикальном взлете и посадке, значительно упрощающих вопросы эксплуатации с точки зрения применяемого стартово-посадочного оборудования.

## Состав и классификация БПЛА

Беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) будем обозначать ЛА, не имеющий на борту пилота, использующий силу тяги двигателей и аэродинамические силы для многократных полетов в атмосфере, имеющий целевую нагрузку, определяющую его назначение, и осуществляющий полет как по заранее заданной программе, так и при необходимости с использованием дистанционного (радиокомандного) управления [2].

В настоящее время резко возрастает роль программного управления БПЛА. Это связано с общемировой тенденцией увеличения уровня автономности БПЛА при решении поставленных целевых задач, особенно в составе находящихся в воздухе группировок БПЛА.

Преимущественное использование программного управления БПЛА дополнительно объясняется необходимостью разгрузки операторов.

Типовой состав БПЛА представлен на Рис.1

Приведем классификацию БПЛА по основным конструкционным и функциональным признакам.

По конструкционным признакам существующие и перспективные БПЛА разбиваются на следующие виды:

* БПЛА самолетных схем;
* БПЛА вертолетных схем.

По типу использования в составе БПЛА силовых установок выделяются:

* БПЛА с электродвигателем;
* БПЛА с поршневым двигателем;
* БПЛА с воздушно-реактивным двигателем.

По возможностям решения целевых задач БПЛА подразделяются на следующие типы:

* БПЛА ближнего действия с длительностью полета 1-2 часа;
* БПЛА среднего действия с полетным временем 6-12 часов;
* БПЛА дальнего действия с продолжительностью полетов 24-48 часов.

По взлетной массе БПЛА разделяют:

* Сверхлегкие (до 5кг);
* Легкие (до 200кг);
* Средним (до 1000кг);
* Тяжелым (более 1000кг).

По высоте полета БПЛА делятся на:

* Низковысотные (до 1 000м);
* Средневысотные (до 10 000м);
* Высотные (до 15 000 – 20 000 м).

По назначению БПЛА разбиваются на:

* Стратегические;
* Тактические;
* Специального назначения.

Конкретизируя классификацию БПЛА по функциональному назначению получим следующую схему:



Отметим, что БПЛА гражданского назначения в настоящее время находятся в стадии становления.

К основным задачам БПЛА относятся:

* Мониторинг (контроль) подстилающей поверхности, атмосферы, объектов инфраструктуры и других объектов;
* Ретрансляцию радиосигналов;
* Доставку и сброс грузов.

Областями возможного применения БПЛА гражданского назначения являются:

* Топливно-энергетический комплекс (контроль состояния нефте- и газопроводов, линий электропередач и т.д.);
* Службы ликвидации чрезвычайных ситуаций (мониторинг техногенных и природных катастроф, обеспечение спасательных операций и т.д.);
* Службы безопасности (контроль нарушения границ объектов, поиск нарушителей и др.);
* Судоходство (поиск и обнаружение судов, терпящих бедствие, судов-нарушителей, контроль границ и правил рыболовства и др.);
* Сельское хозяйство (наблюдение за состоянием земель и определение характеристик почв, распыление удобрений и ядохимикатов и т.д.);
* Океанология (мониторинг воздушной и водной сред);
* Метеорология (контроль гидрометеобстановки, экологической мониторинг и т.п.);
* Геологоразведка (поиск полезных ископаемых в труднодоступных районах, поверхностное зондирование Земли и др.).

## Развитие технологий БПЛА

В настоящее время беспилотные летательные аппараты самолетной и вертолетной схем разрабатываются и производятся в более чем 30 странах мира. Лидером в данной области являются США.

Отечественная беспилотная авиационная техника, которая зародилась в 60-70 годах прошлого столетия, переживает в настоящее время кризис своего развития. Это связано с высоким уровнем аварийности существующих образцов БПЛА. Причинами аварийности являются неудовлетворительные характеристики управляемости и устойчивости БПЛА, недостатки в их системах управления, линиях передачи информации, недостаточной прочности конструкции БПЛА и плохими навыками операторов управления.

Другой причиной высокой аварийности БПЛА является тот факт, что до настоящего времени БПЛА рассматриваются и эксплуатируются на практике в основном как дистанционно пилотируемые ЛА (ДПЛА). Последнее означает, что основным режимом управления полетом БПЛА является ручной радиокомандный режим, реализуемый оператором с мобильного наземного пункта управления, входящего в состав беспилотного авиационного комплекса.

Пренебрежение сложными программными режимами управления полетами БПЛА, когда программируются только их прямолинейные траектории движения между поворотными пунктами маршрута, за счет объективных ошибок операторов управления и приводит к их высокой аварийности. К причинам таких ошибок можно отнести сложность точного пилотирования ДПЛА по удаленному изображению местности на экране оператора, запаздывание и помехи в радиолинии управления, внезапные порывы ветра, усталость операторов и др. Кроме этого, применение БПЛА как ДПЛА не позволит по психофизиологическим ограничениям операторов обеспечить применение крупных группировок БПЛА, когда каждый оператор должен управлять несколькими находящимися в воздухе БПЛА [2].

В табл. 1 приведены данные, полученные специалистами ВВИА им профессора Н.Е. Жуковского, отражающие выраженную в процентах степень замещения летчика современного боевого ЛА автоматом при выполнении различных полетных операций.

***Степень замещения функции летчика автоматом***

*Таблица 1*

|  |  |
| --- | --- |
| ***Полетные операции*** | ***Степень замещения летчика автоматом***  ***(%)*** |
| Управление движением самолета в полете (выбор траектории, направления и режима полета) | **40** |
| Принятие решения на применение авиационных средств поражения | **80** |
| Действия в особых случаях полета при отказе бортовых систем | **12** |
| Вывод из опасного режима полета | **95** |
| Управление полетом при невозможности выполнения летчиком своих функций | **100** |
| Поиск, идентификация воздушной цели в условиях ближнего воздушного боя | **25** |
| Поиск, идентификация воздушной цели в условиях воздушного боя на средних и дальних дистанциях | **95** |
| Атака наземной (надводной) цели | **25** |
| Взлет, посадка, полет по маршруту | **45** |
| Боевое маневрирование, выбор маневра, уклонение от угрозы | **10** |
| Управление ЛА при повреждении планера, его систем, выдача рекомендаций | **5** |

## Варианты управления БПЛА

В зависимости от типа управления беспилотные летательные аппараты делятся на: неуправляемые, дистанционно-пилотируемые и автономные. Долгое время основную часть БПЛА составляли дистанционно-пилотируемые аппараты. Сегодня на смену дистанционно-пилотируемым аппаратам приходят автономные аппараты, способные самостоятельно выполнять поставленную задачу при минимальном вмешательстве человека-оператора.

Несмотря на то, что широко известные модели БПЛА по размерам соизмеримы с пилотируемыми летательными аппаратами, 95% всех БПЛА составляют именно микро- и миниБПЛА, что свидетельствует о большой востребованности малоразмерных БПЛА.

Одним из основополагающих факторов, выступающих в пользу малогабаритных БПЛА, является цена их производства. Несмотря на то, что производство единичных опытных образцов мини- и микроБПЛА нельзя считать дешевым, тем не менее, расчеты стоимости серийных образцов в случае их массового производства обнадеживают. Для сравнения, стоимость одного полноразмерного аппарата составляет около 10 млн долларов США, в то время как стоимость миниБПЛА лежит в пределах 20-30 тысяч долларов, а расчетная стоимость микроБПЛА при их массовом производстве оценивается в 10 долларов за единицу [4].

Массовое производство малоразмерных БПЛА приведет не только к удешевлению единичного образца, но и к возможности их группового применения. Использование групп и комплексов малоразмерных БПЛА позволит существенно расширить область их применений. Ряд проблем, стоящих сейчас на пути применения малоразмерных БПЛА, отпадает при групповом применении.

# Системы и алгоритмы управления группой БПЛА

Для того чтобы практически реализовать те преимущества, которые достигаются в результате включения БПЛА в состав смешанных тактических групп, разработчикам БПЛА необходимо решить ряд задач технического и тактического характера:

* обеспечение требуемой степени живучести БПЛА;
* оснащение БПЛА радиоэлектронной аппаратурой согласно требованиям малой заметности. Собственные излучения являются сильными демаскирующими признаками, что повышает вероятность поражения БПЛА (например, наводящимися на излучение ракетами);
* обеспечение устойчивой связи с удаленными абонентами во время проведения радиоэлектронной атаки (собственные помехи могут привести к невозможности оперативной корректировки задач БПЛА и срыву передачи разведывательной информации другим потребителям). Одной из возможных мер является повышение степени автономности аппарата. Линии связи должны быть защищены также и от воздействия средств РЭП со стороны противника;
* обеспечение передачи больших объемов информации в реальном масштабе времени. Практически невозможно запрограммировать БПЛА на все те изменения боевой обстановки, которые могут возникнуть в ходе выполнения целевой задачи. Решение о корректировке задач может быть принято оператором на станции управления, но для этого он должен получить исчерпывающую информацию об обстановке;
* обеспечение высокой степени надежности бортовых систем, поскольку от успешности применения БПЛА зависит безопасность пилотируемых платформ.
* Кроме того, БПЛА должны в значительной степени обладать свойствами автономности, чтобы функционировать в условиях временно потерянной или неустойчивой связи со станцией управления;
* достижение согласованности действий с экипажами пилотируемых летательных аппаратов.

Проведенный анализ современного состояния и перспектив развития БПЛА однозначно указывает, что по своим техническим и функциональным возможностям они могут выступать в качестве эффективного дополнения к пилотируемым ЛА в составе смешанных тактических групп. Однако, преимущества, достигаемые в результате перехода к подобным смешанным тактическим группам ЛА проявляются по разному в зависимости от специфики конкретных целевых задач, на решение которых они ориентированы.

Важнейшим концептуальным моментом с точки зрения организации управления смешанной тактической группой ЛА является роль и место БПЛА в боевых действиях будущего. По этому поводу среди военно-научных специалистов продолжается дискуссия. Часть авторитетных военачальников и авиационных командиров сомневаются, смогут ли БПЛА, действующие в соответствии с формальной логикой, быстро ориентироваться в обстановке, отличной от ожидаемой, даже при наличии управляющих ими высококвалифицированных операторов. Не забывают сказать они и о малой эксплуатационной надежности таких аппаратов, сложности управления ими, особенно если в воздухе находится большое количество БПЛА. Конечно, по мнению военного руководства, перспективные БПЛА будут способствовать росту боевой мощи ВВС и может быть даже несколько потеснят пилотируемые ЛА, но в силу свойственных им недостатков их роль будет заключаться главным образом в том, чтобы обеспечивать боевые действия авиации и наносить удары по известным объектам противника в относительно несложной обстановке.

Другая, большая часть компетентных в вопросах строительства БПЛА профессионалов утверждает обратное. В качестве аргументов приводятся возрастающий уровень потерь экипажей пилотируемых самолетов по мере развития систем ПВО, а с другой - еще непознанные возможности логики технических, технологических решений боевого применения БПЛА, открывающие новые перспективы.

Немаловажное значение приобретают и такие факторы, как относительно небольшая стоимость производства и отсутствие необходимости затрат на подготовку летного состава. Американские авиационные эксперты подсчитали, что ВВС США ежегодно расходуют на первоначальное обучение одного летчика около 2 млн долларов, а на поддержание уровня натренированности летного состава только тактических истребителей F-16 (около 2 тыс. человек) - 1 млрд. В этом контексте специалисты по безопасности полетов отмечают парадоксальный момент, суть которого сводится к такому тезису: «с ростом надежности авиационной техники увеличивается число авиационных происшествий из-за человеческого фактора». Указывается также на необходимость привлечения для обеспечения боевых действий авиации частей и подразделений дозаправки топливом, РЭБ, поиска и спасения экипажей и другие. Боевые БПЛА считаются экономически выгодными по сравнению с крылатыми ракетами, каждая из которых стоит более 1 млн долларов и применяется лишь однократно.

То есть, как пилотируемые, так и беспилотные авиационные комплексы имеют собственные преимущества и недостатки. Учитывая это, большинство военных аналитиков считают, что в обозримом будущем должны активно развиваться и применяться как беспилотные, так и пилотируемые средства, дополняя друг друга в разумном сочетании в плане их боевых возможностей. При этом чем опаснее будет обстановка и больше степень риска для экипажей, тем острее будет ощущаться необходимость применения беспилотных летательных аппаратов. При определении места БПЛА в смешанной авиационной группировке отмечается, что они могут включаться в боевые порядки авиации или следовать с некоторым опережением на дистанции, исключающей своевременный перенос огня зенитных средств по идущим вслед за ними пилотируемым ударным группам. При подходе к объектам БПЛА надлежит первым произвести доразведку и обнаружение целей, а также подавление средств ПВО и нанести по ним удары маломощными боеприпасами до подхода пилотируемых самолетов с более мощными средствами поражения [3].

## Системы на основе «роевого интеллекта»

Одной из серьезных проблем, стоящих на пути использования малоразмерных БПЛА, являются сложности в обеспечении радиосвязи с операторским пультом управления. Дело в том, что малые размеры накладывают существенные ограничения на запас бортового энергоресурса, большая часть которого предназначена для обеспечения движения, и лишь небольшая часть энергоресурса может использоваться приемопередающей аппаратурой. Таким образом, мощность радиопередатчиков сильно ограничена. Небольшие размеры БПЛА также ограничивают размер.

Одним из решений этой проблемы является использование нацеленных наземных антенн для сопровождения аппарата по линии визирования, очевидно, что такой подход существенно ограничивает область применения малоразмерных БПЛА.

Использование групп БПЛА делает вопрос обеспечения связи еще более актуальным. При централизованных стратегиях управления каждому БПЛА требуется канал связи с пропускной способностью в несколько Мбит/с для передачи изображений и другой информации об окружающей среде. Частичным решением проблемы может послужить использование централизованных иерархических стратегий управления, при которых связь с центральным устройством управления есть лишь у некоторых БПЛА, каждый из которых передает команды аппаратам своей подгруппы, причем дистанции между аппаратами подгруппы относительно невелики, а, следовательно, и энергозатраты на такую передачу не столь существенны. Тем не менее, необходимость постоянной связи БПЛА верхнего уровня иерархии с центральным устройством управления остается проблемой.

В качестве решения проблемы информационного обмена в группах БПЛА можно использовать методы роевого интеллекта.

Роевой интеллект – это дисциплина, которая изучает природные и искусственные системы, состоящие из большого количества отдельных объектов (особей, агентов и т.п.), которые осуществляют децентрализованное управление на основе принципов самоорганизации. В частности, эта дисциплина сосредоточена на коллективном поведении в результате локальных взаимодействий отдельных объектов между собой и с окружающей средой. Роевой интеллект описывает коллективное поведение децентрализованной самоорганизующейся системы, природного или искусственного происхождения.

В группе БПЛА, взаимодействующей на основе роевого интеллекта, каждый аппарат осуществляет взаимодействие лишь с некоторыми, ближайшими к нему в данный момент, аппаратами. При этом дальность связи и энергозатраты на информационную передачу относительно невелики. БПЛА принимает решение о текущем поведении, опираясь на самостоятельно собранные данные об окружающей среде, а также на те данные, которые передают соседние аппараты. Энергозатратная связь с центральным устройством управления осуществляется лишь изредка, и, возможно, не всеми аппаратами группы, лишь для того, чтобы получить информацию о задачах, стоящих перед группой, и для того чтобы передать отчетную информацию о состоянии группы и ходе выполнения поставленной ранее задачи.

Использование роевых методов взаимодействия в группах БПЛА помогает решить еще одну проблему малоразмерных БПЛА – сбор данных об окружающей среде. Дело в том, что малые габариты аппарата существенно ограничивают доступный набор бортовых сенсорных устройств. Ограниченный энергоресурс также неблагоприятно сказывается на допустимые энергозатраты средств сбора данных об окружающей среде, что приводит к уменьшению радиуса работы активных средств сбора данных, таких как лазерные дальномеры, ультразвуковые датчики и т.п. Эти ограничения приводят к тому, что малоразмерный БПЛА способен самостоятельно собрать информацию лишь об относительно небольшой области пространства вокруг себя. Тем не менее, для обеспечения устойчивого полета аппарату необходимы данные неподвижных и движущихся препятствий, расположенных в значительно большей зоне, особенно по курсу движения. При роевом взаимодействии в группе БПЛА соседние аппараты обмениваются информацией об окружающей среде, расширяя доступные друг другу сведения о препятствиях, воздушных потоках, и других важных параметрах среды.

## Прикладные многоагентные системы управления

Проблема коллективного поведения и группового управления не является новой и исследуется уже в течение нескольких десятилетий, начиная с классических работ Дж. Фон Неймана, М. Цейтлина, В. Варшавского и Д. Поспелова и др. Ее актуальность возрастает год от года, причем в настоящее время проблема группового управления ставится уже по-новому, а для ее решения требуются новые парадигмы концептуализации, новые модели формализации и новые архитектуры построения, что, в свою очередь, требует создания новых технологий проектирования и программной реализации. Обусловлено это, прежде всего, особенностями современных прикладных задач группового управления, в частности, значительным возрастанием их масштабности, необходимостью обеспечить согласованное функционирование большого количества гетерогенных подсистем, организованных в сеть, различные узлы которой могут работать в различных операционных средах и использовать различные коммутационные протоколы. В таких приложениях самыми трудными оказываются две очень разные задачи, а именно: обеспечение эффективной координации группового поведения и создание программной инфраструктуры (платформы) поддерживающей взаимодействие большого количества разнородных устройств и программ.

С точки зрения архитектуры современные приложения характеризуются такими свойствами, как открытость и автономность. Открытость понимается как способность прикладной системы группового управления изменять в процессе работы свою структуру (за счет изменения количества автономных подсистем и структуры их связей), а автономность понимается как способность объектов приложения формировать и изменять при необходимости свои текущие цели, функционировать без вмешательства человека и осуществлять самоконтроль над своими действиями и внутренним состоянием.

Также появляются требования к информационным технологиям:

* Сетевая организация с очень большим числом узлов.
* Большое число источников, генерирующих огромные потоки данных, которые технически невозможно хранить в каком-либо централизованном хранилище. Для последующего решения задач анализа и принятия решений в архитектуре с централизованной обработкой могут потребоваться вычислительные средства нереальной производительности;
* Открытость систем, когда состав узлов сети и ее топология постоянно изменяются. Действительно, беспилотные летательные аппараты, формирующие распределенную систему наблюдения, могут прекращать свое существование в любой момент времени;
* Конфиденциальность данных отдельных источников, поскольку данные могут попадать под понятие военной или государственной тайны, носить коммерческий характер и т.п.;
* Сочетание автономности задач, которые решаются программными сущностями, установленными в различных узлах сети, с необходимостью координации поведения и кооперации соответствующих автономных программ.

## Адаптивное управление автономной группой БПЛА

Как было сказано ранее, большинство современных систем управления группой БПЛА характеризуются отсутствием автономной постановки новых задач, позволяющей группе оперативно принимать эффективные решения по изменению сценария выполнения поставленной задачи. Типичными примерами событий, вызывающих необходимость в постановке новых задач, являются: появление новой выгодной информации, для более эффективного выполнения задачи; выход из строя части имеющихся ресурсов; а также изменение критериев принятия решений. Чем выше неопределенность, чем более распределенный характер имеют процессы принятия решений и чем чаще случаются незапланированные события, тем ниже эффективность существующих систем, неспособных самостоятельно принимать решения и автоматически перестраиваться под изменения в среде. Кроме того, любая модификация схем принятия решений в традиционных системах представляет собой весьма сложный и трудоемкий процесс и требует высокой квалификации исполнителей, что делает разработку и эксплуатацию рассматриваемых систем крайне дорогостоящими.

Для решения подобных проблем применяются мультиагентные технологии. В основе этих технологий лежит понятие «агента», программного объекта, способного воспринимать ситуацию, принимать решения и взаимодействовать с себе подобными.

Характерными особенностями интеллектуальных агентов являются:

* Коллегиальность, т.е. способность к коллективному целенаправленному поведению в интересах решения общей задачи.
* Автономность, т.е. способность самостоятельно решать локальные задачи.
* Активность, т.е. способность к активным действиям ради достижения общих и локальных целей.
* Информационная и двигательная мобильность, т.е. способность активно перемещаться и целенаправленно искать и находить информацию, энергию и объекты, необходимые для кооперативного решения общей задачи.
* Адаптивность, т.е. способность автоматически приспосабливаться к неопределенным условиям в динамической среде.

Эти возможности кардинально отличают мультиагентные системы от существующих «жестко» организованных систем управления группы автономных БПЛА.

Для разработки мультиагентной системы для группы БПЛА желательно выполнение двух основных требований:

1. На каждой модели должен быть небольшой, но мощный микрокомпьютер для работы в реальном времени как автопилот, а также для общения агентов между собой.
2. Необходимо организовать уверенную связь между агентами группы.

## Решение задачи об обнаружении источников радиосигнала группой БПЛА

Для того, чтобы наглядно продемонстрировать преимущество группы летательных аппаратов перед одним, приведем в качестве примера решение конкретной задачи об обнаружении источников радиосигнала. Пусть у нас есть несколько источников радиосигнала и несколько БПЛА, оборудованных сверхчувствительными датчиками, способными улавливать мощность радиосигнала. Перед экспериментом число источников нам неизвестно. Известно, что они могут перемещаться, но при этом все они вещают на одной частоте.

Одному БПЛА никогда не решить такую задачу точно. Это связано с тем, что каждый самолет в отдельности получает зашумленный сигнал. Однако, группе удается точно и быстро определять правильное местонахождение источников.

Разработанная для этой задачи модель использует 3 ключевые идеи в своем решении:

1. Каждый БПЛА использует байесову сеть для построения распределения вероятности нахождения источника радиосигнала в каждой конкретной точке. Для построения сети он использует не только свои данные, но и выборочные показатели сигнала, пересылаемые другими летательными аппаратами. Таким образом, каждый БПЛА для каждой точки облетаемой территории высчитывает вероятность нахождения источника сигнала в данной точке.
2. Каждый самолет имеет свой планировщик маршрута, который на вход принимает начальную точку пути, карту энтропии, полученную аппаратом, маршруты других самолетов, карту местности, а на выходе координаты дальнейшего полета. Планировщик стремится решить две основные задачи: облететь точки с максимальной энтропией информации, дабы максимально уточнить картину мира, и пролететь над участками, которые не исследованы другими участниками группы.
3. По карте распределения вероятности нахождения источников определить группу мест в которые необходимо направить БПЛА.

Проводя итог краткого описания задачи, заметим, что она имеет множество важных применений. Прежде всего – военная разведка и поиск людей, которых можно обнаруживать по сигналу, например, исходящему от телефона.

# Разработка алгоритма группового взаимодействия с использованием радиоканала

В настоящее время исследования и разработки в области систем группового управления ведутся во многих странах, в них вовлекаются большие коллективы людей, исследования и разработки проводятся во многих направлениях. Тем не менее, до сих пор не создано (информационной) технологии, которая была бы в состоянии справиться с реализацией приложений в области группового управления с учетом особенностей, отмеченных в главе 3.2.

В настоящей работе ставится цель решить вторую основную задачу создания адаптивной мультиагентной системы, а именно: необходимо организовать уверенную связь между агентами группы, а также связь группы с наземным комплексом управления (базовой станцией).

Как было сказано в главе 3.1, из-за ограниченных размеров БПЛА и, как следствие, ограниченных размеров энергоресурса (аккумуляторной батареи) и антенны, нет возможности использовать мощный радиопередатчик для постоянной связи каждого отдельного агента группы с базовой станцией и отдаленными агентами внутри группы. Решением такой проблемы является использование маломощных передатчиков для связи внутри группы и мощного передатчика для связи с базовой станцией. Также, для обеспечения незаметности группы, имеет смысл использовать маломощные шумоподобные сигналы.

Из сказанного выше следует, что необходимо иметь по 2 приемопередатчика на борту каждого агента (БПЛА) группы. Один будет отвечать за связь отдельно взятого БПЛА с другими БПЛА внутри группы, второй будет отвечать за связь группы с базовой станцией.

## Организация управляющего канала «пункт управления – группа БПЛА»

Современные условия диктуют тенденцию делать группу БПЛА более автономной, однако сама группа, а также базовая станция должны иметь возможность в любой момент времени связаться друг с другом.

Группа БПЛА может удаляться от пункта управления на большие расстояния, следовательно, для организации связи требуются мощные передатчики, расходующие большие затраты энергии. Как было сказано ранее, это неэффективно. Частичным решением проблемы является распределение доступа между агентами к использованию радиоканала для связи с базовой станцией.

При организации связи внутри группы (которая будет рассмотрена далее) каждый БПЛА получает необходимую информацию о состоянии других БПЛА. Состав этой необходимой информации может определяться под каждую конкретную задачу, а также зависит от необходимого минимального времени обновления информации о группе. Таким образом, чем больше информации надо знать о группе, тем больший объем занимает эта информация, как следствие, дольше передается. Так как доступ к эфиру распределен по времени, то каждому агенту группы, выделяется свой промежуток времени, в который он может использовать радиоканал.

Пример состав и содержание данных, находящихся в памяти контроллера каждого БПЛА и обновляющихся каждый промежуток времени, равный времени обновления информации о группе, приведен в табл.1.

***Примерный состав и содержание данных в памяти БПЛА***

*Таблица 2*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **ID** | **RSSI** | **Координаты** | **Состояние** | **Выполняемая команда** |
| 1 | -110 | x, y, z | 0 | 23 |
| 2 | -44 | x, y, z | 1 | 23 |
| 3 | -35 | x, y, z | 2 | 23 |
| … | … | … | … |  |
| N | -78 | x, y, z | 3 | 22 |

В таблице столбцы содержат следующую информацию:

* ID – уникальный идентификатор приемопередатчиков каждого конкретного БПЛА;
* RSSI – уровень сигнала с базовой станцией (дб);
* Координаты – координаты БПЛА в произвольной системе координат;
* Состояние – состояние конкретного БПЛА, например: выполняет общую задачу, двигатель неисправен и т.д.;
* Выполняемая команда – уникальный идентификатор команды, которая выполняется в данный момент времени.

Надежность и энергоэффективность работы системы управления обеспечивается тем, что в каждый момент времени каждый элемент группы обладает одинаковой полезной информацией. Следовательно, с точки зрения информативности, все равно какой БПЛА будет связываться с пунктом управления. Поэтому связываться будет тот агент, который находится в наиболее выгодном положении в смысле энергоэффективности.

Важным фактором при построении системы управления с динамическим временным доступом к радиоканалу является определение самих временных характеристик. Главными из которых являются периодичность и продолжительность доступа. Для определения этих параметров следует отталкиваться от:

1. Скорость обработки поступающей информации микроконтроллером;
2. Динамические характеристики модуля радиоканала;
3. Необходимой частоты получения обновленной информации;

Проанализировав вышесказанное, установим время доступа к радиоканалу для группы и пункта управления равное 0.1с. Такая частота взаимодействия обеспечивает достаточную информативность для решаемых задач. Тогда временная шкала занятости радиоканала будет выглядеть следующим образом:



Как видно, доступ к радиоканалу по очереди получает группа и базовая станция. Это определяется двумя факторами: а) Избежание коллизий смежных сигналов; б) Полудуплексный режим работы приемопередатчиков. Под коллизией подразумевается наложение двух и более пакетов, передающихся в одно и то же время по одному радиоканалу (на одной частоте).

Осталось определить кто именно из группы будет общаться с базовой станицей. Т.к. каждый элемент группы знает минимально необходимую информацию об остальных участниках группы (в том числе и RSSI с БС), исходя из принципа наименьших энергозатрат, доступ будет получать тот, у кого уровень RSSI с БС больше всех, а если есть пара агентов с одинаковым RSSI, то тот, у кого меньше уникальный ID.

Базовая станция может инициировать связь с конкретным агентом либо послать широковещательное сообщение всей группе.

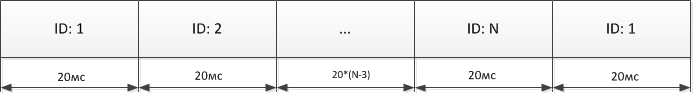
## Организация взаимодействия внутри группы БПЛА

Внутри группы БПЛА общаются при помощи маломощного радиомодуля. Во избежание коллизий в этом радиоканале также используется дифференцированный доступ к эфиру.

Каждый БПЛА при необходимости (обновлении полезной информации или через определенный промежуток времени) отправляет сообщение в строго отведенное для него время, а затем переходит в режим приема и анализирует информацию от других агентов.

Рассчитаем время, необходимое для передачи одного сообщения с учетом того, что средний размер пакета при общении внутри группы равен 23 байтам, а скорость передачи равна 55.5 kbps (далее будет приведено подробное обоснование выбора данных величин):

Выделим для передачи сообщения каждому БПЛА 20мс, чего будет с запасом достаточно. Тогда временна шкала занятости рассматриваемого радиоканала примет вид:



## Работа внутригрупповой системы взаимодействия совместно с внешним каналом управления

Основу алгоритма взаимодействия с пунктом управления составляет передача сводной таблицы, заполняемой при организации связи внутри группы.

Каждый раз когда базовая станция инициирует соединение с группой (или группа с БС), конечным агентом с которым установлена связь передаются данные таблицы. На основании этой таблицы оператор при помощи программно-математического обеспечения базовой станции принимает управленческие решения для всей группы.

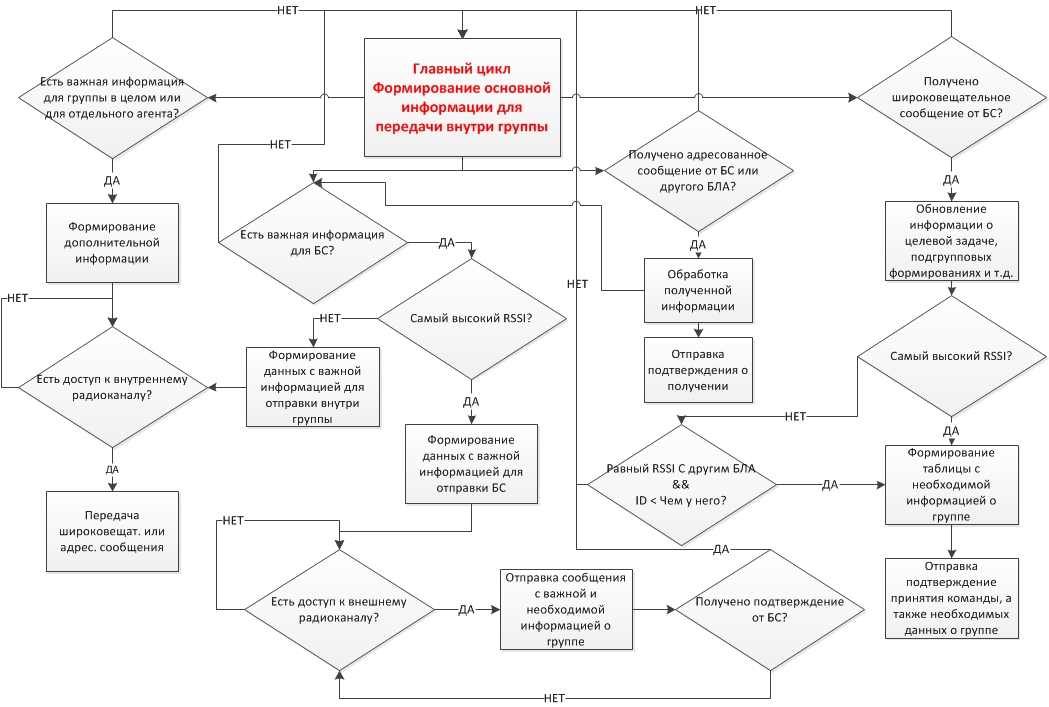
Управленческим решением БС является формирование кода команды, который способен распознать любой участник группы (коды команд закладываются перед выполнением целевой задачи в энергонезависимую память).

Отдельного внимания заслуживает механизм распространения команд от базовой станции по всей группе. Т.к. широковещательный радиосигнал от БС группе в силу неконтролируемых причин может не дойти до некоторых агентов, каждый БПЛА, при общении внутри группы вместе с другими данными передает 3 последние команды и время их получения от базовой станции. Следовательно, конечный участник группы, приняв такое сообщение и сопоставив последнюю команду с той, которая выполняется им в текущий момент времени, при несоответствии принимает решение о выполнении новой команды.

## Блок-схема алгоритма взаимодействия

Объединив вышесказанное, формализуем алгоритм группвого взаимодействия:

1. В главном цикле все время формируется и обновляется таблица, указанная в главе 4.2;
2. С учетом доступа к внутреннему радиоканалу и обновлении полезной информации отправляем широковещательные сообщения группе с необходимой информацией;
3. Если есть важная информация для БС: формируем эту информацию, смотрим у кого в группе самый высокий RSSI, если у текущего БПЛА, то ждем доступа к внешнему радиоканалу и отправляем информацию БС, если у другого БПЛА, то отсылаем сформированную информацию ему с определенными пометками.
4. Если у текущего БПЛА самый высокий RSSI и было принято важное сообщение для БС от другого БПЛА, то ждем доступа к внешнему радиоканалу и отправляем сообщение БС.
5. Если получено сообщение от БС и у нас самый высокий RSSI или при равных RSSI меньший ID, то отправляем подтверждение базовой станции.



## Содержание и объем передаваемой информации

Для каждой решаемой задачи набор минимально необходимых данных, а также набор команд и другая вспомогательная информация будут отличаться. Определим приблизительный объем ***полезной*** информации, передаваемый в общем случае. Под полезной информацией подразумевается информация, которую непосредственно имеет смысл передавать, не включая технической информации для организации связи (пре-амбула, заголовок пакета, длина пакета, контрольная сумма и т.д.).

### *Информация при общении внутри сети*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Название | Необходимость | Объем, байт | Тип данных |
| Network ID | 1 | 1 | byte |
| Destination ID | 1 | 1 | byte |
| Sender ID | 1 | 1 | byte |
| RSSI | 1 | 1 | byte |
| State | 0.8 | 1 | byte |
| Commands | 0.8 | 6 | Array of byte |
| Coordinate’s | 0.5 | 12 | Array of float |
|  |  |  |  |
| **ИТОГО** |  | **23** |  |

где Network ID – уникальный идентификатор подсети, в которой находится БПЛА (необходим для разбиения группы на подгруппы);

Destination ID – уникальный идентификатор БПЛА, которому адресовано сообщение;

Sender ID – уникальный идентификатор БПЛА, отправляющего сообщение;

RSSI – уровень сигнала с базовой станцией;

State – состояние БПЛА;

Commands – массив из кодов последних выполняемых команд, а также временных меток, соответствующих получению этих кодов от БС;

Coordinate’s – координаты текущего БПЛА.

В итоге имеем размер полезной информации в общей случае, равный 23 байтам.

### *Информация при общении с базовой станцией*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Название | Необходимость | Объем, байт | Тип данных |
| Network ID | 1 | 1 | byte |
| Destination ID | 1 | 1 | byte |
| Sender ID | 1 | 1 | byte |
| Group\_state | 1 | 20 \* N | byte |
|  |  |  |  |
| **ИТОГО** |  | **3 + (20 \* N)** |  |

где Group\_state – таблица, представленная в главе 4.1.

В итоге имеем размер полезной информации, зависящий от количества БПЛА в группе, равный байтам.

Рассмотрим случай, когда группа состоит из 20 летательных аппаратов. Получаем размер, передаваемой БС полезной информации равный:

байт

Ранее было сказано, что максимальное время, за которое можно установить соединение базовой станции с группой и наоборот, равное 0.2 секундам, удовлетворяет большинству возможных решаемых задач. Рассчитаем время, за которое передается 403 байта при скорости 55.5kbps (подробное обоснование выбранной скорости будет приведено позднее):

## Обеспечение контроля надежности и достоверности передаваемых сигналов управления

Для обеспечения контроля качества организации связи приняты следующие меры:

* Acknowledge – механизм подтверждения сообщений. Основан на том, что каждое адресованное сообщение должно быть подтверждено. При неподтверждении сообщении отправляется заново с учетом доступа к радиоканалу.
* Подсчет контрольной суммы сообщения. В настоящей работе был выбран алгоритм CRC.

При передаче пакетов по реальному каналу могут возникнуть искажения исходной информации вследствие разных внешних воздействий: электрических наводок, плохих погодных условий и многих других. Сущность методики в том, что при хороших характеристиках хэш-функции в подавляющем числе случаев ошибка в сообщении приведет к изменению вычисленного на приеме значения CRC. Если исходная и вычисленная суммы не равны между собой, принимается решение о недостоверности принятых данных, и запрашивается повторная передача пакета.

Контрольная сумма – некоторое значение, рассчитанное по набору данных путем применения определенного алгоритма и используемое для проверки целостности данных при их передаче или хранении. Также контрольные суммы могут использоваться для быстрого сравнения двух наборов данных на неэквивалентность.

С точки зрения математики контрольная сумма является результатом хеш-функции, используемой для вычисления контрольного кода – небольшого количества бит внутри большого блока данных. Значение контрольной суммы добавляется в конец блока данных непосредственно перед началом передачи или записи данных.

Циклический избыточный код (cyclic redundancy check) – алгоритм нахождения контрольной суммы. CRC является практическим приложением помехоустойчивого кодирования, основанном на определенных математических свойствах циклического кода.

Алгоритм CRC базируется на свойствах деления с остатком двоичных многочленов. Значение CRC является по сути остатком от деления многочлена, соответствующего входным данным, на некий фиксированный многочлен.

Каждой конечной последовательности битов взаимно однозначно сопоставляется двоичный полином , последовательность коэффициентов которого представляет собой исходную последовательность.

Значение контрольной суммы в алгоритме с порождающим многочленом степени определяется как битовая последовательность длины , представляющая многочлен , получившийся в остатке при делении многочлена , представляющего входной поток бит, на многочлен .

где – многочлен, представляющий значение CRC;  
 – многочлен, коэффициенты которого представляют входные данные;

– порождающий многочлен;  
 – степень порождающего многочлена.

## Основные требования, предъявляемые модулям радиоканала

Как было сказано ранее, необходимо использовать 2 приемопередающих устройства: первый для связи внутри группы с использованием маломощных шумоподобных сигналов, второй для связи группы с базовой станцией. Определим основные требования, предъявляемые радиомодулям:

1. Приемопередатчик для связи внутри группы должен:

* Использовать маломощный шумоподобный сигнал;
* Иметь скорость передачи данных, обеспечивающую надежную передачу информации внутри группы (с учетом расчетов, представленных в главе 4.5);
* Иметь уникальный идентификатор (адрес отправителя/получателя);
* Иметь аппаратную поддержку пакетной передачи данных;
* Иметь аппаратную возможность организации контроля качества сети (подсчет контрольной суммы для минимизации нагрузки, возлагаемой на микропроцессорное устройство);
* Иметь встроенные регистры для хранения данных;
* Иметь аппаратную поддержку широковещательного адреса;
* Иметь возможность работы в нескольких каналах;
* Иметь малое энергопотребление;
* Иметь малые габариты.

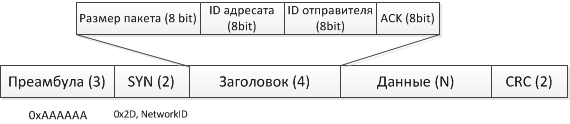
1. Приемопередатчик для связи с базовой станцией должен:

* Иметь импульсную мощность, достаточную для обеспечения надежной связи с базовой станцией;
* Иметь скорость передачи данных, обеспечивающую надежную передачу информации внутри группы (с учетом расчетов, представленных в главе 4.5);
* Иметь возможность уходить в режим сна для более высокой энергоэффективности;
* Иметь уникальный идентификатор (адрес отправителя/получателя);
* Иметь аппаратную поддержку пакетной передачи данных;
* Иметь аппаратную возможность организации контроля качества сети (подсчет контрольной суммы для минимизации нагрузки, возлагаемой на микропроцессорное устройство);
* Иметь встроенные регистры для хранения данных;
* Иметь аппаратную поддержку определения RSSI;
* Иметь аппаратную поддержку широковещательного адреса;
* Иметь возможность работы в нескольких каналах;
* Иметь малое энергопотребление;
* Иметь малые габариты.

Как видно, многие требования, предъявляемые двум различным приемопередающим устройствам, пересекаются. Эту информацию необходимо использовать далее при выборе конкретной элементной базы.

# Протокол взаимодействия на основе разработанного алгоритма

## Структура пакета



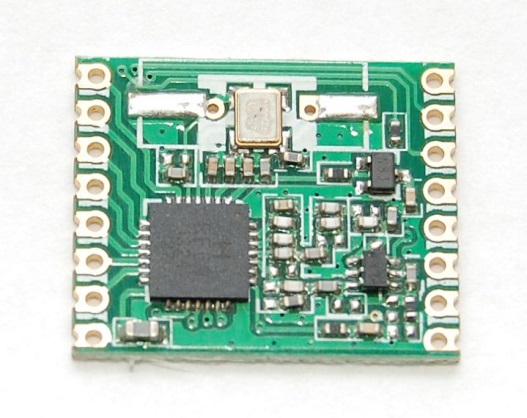
# Аппаратно-техническая реализация. Выбор элементной базы

## Выбор приемопередающего радиомодуля

В главе 4.7 были предъявлены основные требования к радиомодулям.

Проведя анализ рынка, был выбран модуль RFM69HW компании HopeRF, который с запасом удовлетворяет предъявляемым требованиям.

***Описание RFM69HW***



RFM69HW - это радио приемопередатчик, способный работать в широком диапазоне частот, в том числе 315MHz, 433MHz, 868MHz, 915MHz. Все основные параметры радиосвязи программируются и большинство из них можно динамически устанавливать. RFM69HW предлагает уникальные режимы связи, используя которые можно добиться низкой потребляемой мощности.

Основные параметры:

* Максимальная выходная мощность: +20дБм, 100мВт;
* Высокая чувствительность: -120дБм при 1.2kbps;
* Высокая селективность: 16-канальный фильтр;
* Низкий потребляемый ток: 16мА, в режиме поддержки значение регистров 100нА;
* Программируемая выходная мощность: от -18 до +20дБм с шагом в 1дБм;
* Интегрированный синтезатор с разрешением 61Гц;
* Поддержка FSK, GFSK, MSK, GMSK и OOK модуляций;
* Динамический диапазон RSSI;
* Встроенный аппаратный механизм подсчета контрольных сумм;
* Относительно малые габаритные характеристики;
* Связь с микроконтроллером посредством SPI.

Рассмотрим некоторые предъявляемые требования более подробней:

1. Энергопотребление.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Описание** | **Описание** | **Min** | **Typ** | **Max** | **Ед. изм.** |
| Спящий режим | - | - | 0.1 | 1 |  |
| “В холостую” | Вкл. RC генератор | - | 1.2 | - |  |
| Режим ожидания | Включен тактовый генератор | - | 1.25 | 1.5 |  |
| Режим приемника |  | - | 16 | - |  |
| Режим передатчика | RFOP = +20dBm | - | 130 | - |  |
| Режим передатчика | RFOP = +13dBm | - | 45 | - |  |
| Режим передатчика | RFOP = 0dBm | - | 20 | - |  |

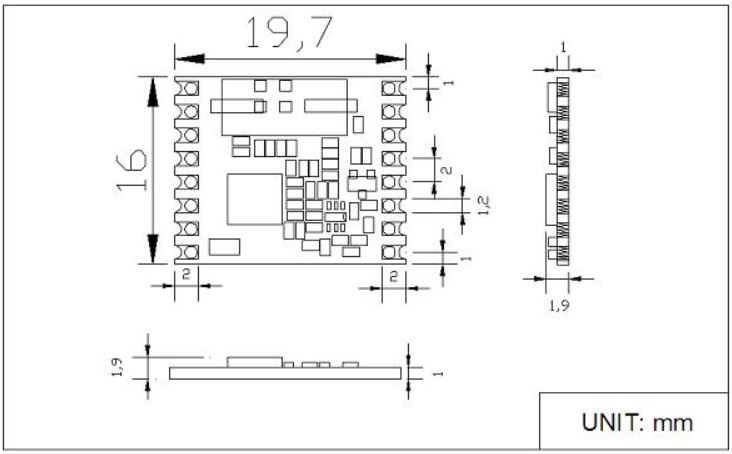
Данное энергопотребление полностью удовлетворяет предъявляемым требованиям.

1. Скорость передачи данных.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Тип** | **Настраиваемый множитель** | **FSK** | **OOK** |
| Классическая скорость передачи (множитель 1.2kbps) | 0x68, 0x2B | 1.2kbps | 1.2kbps |
|  | 0x34, 0x15 | 2.4kbps | 2.4kbps |
|  | 0x1A, 0x0B | 4.8kbps | 4.8kbps |
|  | 0x0D, 0x05 | 9.6kbps | 9.6kbps |
|  | 0x06, 0x83 | 19.2kbps | 19.2kbps |
|  | 0x03, 0x41 | 38.4kbps |  |
|  | 0x01, 0xA1 | 76.8kbps |  |
|  | 0x00, 0xD0 | 153.6kbps |  |
| Классическая скорость передачи (множитель 0.9kbps) | 0x02, 0x2C | 57.6kbps |  |
|  | 0x01, 0x16 | 115.2kbps |  |

Подобный выбор скоростей полностью удовлетворяет потребностям радиоканала для передачи управляющих команд, а также сбора телеметрических данных. Для данной работы была выбрана скорость 57.6kbps

1. Размеры.



## Выбор микроконтроллера

Микроконтроллер ([англ.](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B3%D0%BB%D0%B8%D0%B9%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%8F%D0%B7%D1%8B%D0%BA) *Micro Controller Unit, MCU*) — [микросхема](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B8%D0%BA%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0), предназначенная для управления [электронными](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%B0) устройствами. Типичный микроконтроллер сочетает на одном кристалле функции [процессора](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D1%86%D0%B5%D1%81%D1%81%D0%BE%D1%80) и [периферийных устройств](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B8%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B9%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE), содержит [ОЗУ](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%97%D0%A3) и (или) [ПЗУ](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B7%D0%B0%D0%BF%D0%BE%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B0%D1%8E%D1%89%D0%B5%D0%B5_%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE).

При выборе микроконтроллера необходимо учесть и оценить большое количество факторов. За основу последовательности продуманных действий, приводящих к окончательному решению, может быть принят определенный план, приведенный ниже.

### *Назначение*

Основная цель выбрать наименее дорогой микроконтроллер (чтобы снизить общую стоимость системы), но в то же время удовлетворяющий спецификации системы, т.е. требованиям по производительности, надежности, условиям применения и т.д.

Микроконтроллеры в целом можно разделить на группы 8, 16 и 32 разрядных. Под термином «разрядность» понимается число бит, одновременно хранимых, обрабатываемых или передаваемых в другое устройство.

Тактовая частота или, более точно, скорость шины определяет, сколько вычислений может быть выполнено за единицу времени. Некоторые микроконтроллеры, в основном ранних разработок имеют узкий диапазон допустимой тактовой частоты, в то время как другие могут работать вплоть до нулевой частоты. Иногда выбирается специфическая тактовая частота, чтобы сгенерировать другую тактовую частоту, требуемую в системе, например, для задания скоростей последовательной передачи. В основном, вычислительная мощность, потребляемая мощность и стоимость системы увеличиваются с повышением тактовой частоты. Цена системы при повышении частоты увеличивается из-за стоимости не только микроконтроллера, но также и всех требующихся дополнительных микросхем, таких как RAM, ROM, PLD и контроллеры шины.

Рассмотрим технологию, с использованием которой изготовлен микропроцессор: N канальную металлокиселполупроводник (NMOS), которая использовалась в микроконтроллерах ранних разработок, сравним с современной CMOS технологией с высоким уровнем интеграции (HCMOS). В отличие от ранних NMOS процессоров, в HCMOS уровни сигналов изменяются в диапазоне от 0 до уровня напряжения питания. В связи с этим обстоятельством предпочтение отдается HCMOS процессорам. Кроме того, HCMOS потребляют меньшую мощность и, следовательно, меньше нагреваются. Геометрические размеры элементов в HCMOS меньше, что позволяет иметь более плотные схемы и, таким образом, работать при более высоких скоростях. Более плотный дизайн также уменьшает стоимость отдельного микроконтроллера, т.к. на кремниевой пластине того же размера можно получить большее количество чипов. По этим причинам сегодня подавляющее большинство микроконтроллеров производятся с использованием HCMOS технологии.

За счет достижения более высокого уровня интеграции и надежности при сохранении низкой цены, все микроконтроллеры оснащены встроенными дополнительными устройствами. Эти устройства под управлением микропроцессорного ядра микроконтроллера выполняют определенные функции. Встроенные устройства обладают повышенной надежностью, поскольку они не требуют никаких внешних электрических цепей. К наиболее известным встроенным устройствам относятся устройства памяти и порты ввода/вывода (I/O), таймеры, системные часы/генератор. Устройства памяти включают оперативную память (RAM), постоянные запоминающие устройства (ROM), перепрограммируемую ROM (EPROM), электрически перепрограммируемую ROM (EEPROM). Таймеры включают и часы реального времени, и таймеры прерываний. Следует принимать во внимание диапазон и разрешение таймера, так же как и другие подфункции, такие как функции сравнение и/или захвата входных линий при измерении длительности сигнала. Средства I/O включают последовательные порты связи, параллельные порты (I/O линии), аналогоцифровые преобразователи (A/D), цифроаналоговые преобразователи (D/A), драйверы жидкокристаллического дисплея (LCD) или драйверы вакуумного флуоресцентного дисплея (VFD).

Другими, реже используемыми, встроенными ресурсами являются внутренняя/внешняя шина, таймер слежения за нормальным функционированием системы (сторожевая схема), система обнаружения отказов тактового генератора, возможность выбора конфигурации памяти и системный интеграционный модуль (SIM). SIM обычно заменяет внешнюю "склеивающую" логику, необходимую для организации взаимодействия микроконтроллера с внешними устройствами через заданные контакты микросхемы.

В большинство микроконтроллеров с внутрисхемными ресурсами включается блок конфигурационных регистров для управления этими ресурсами. Иногда сам этот блок может быть отражен в различные места карты памяти.

### *Процесс выбора*

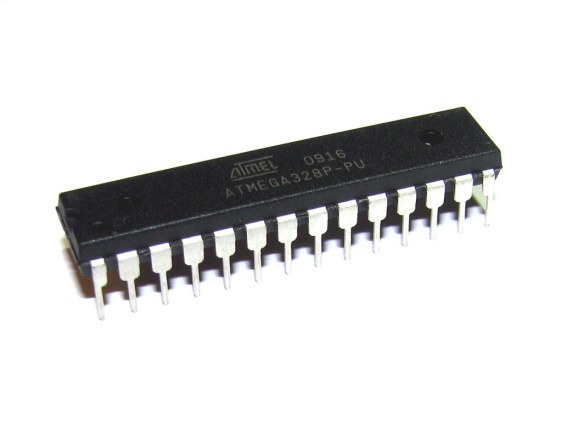
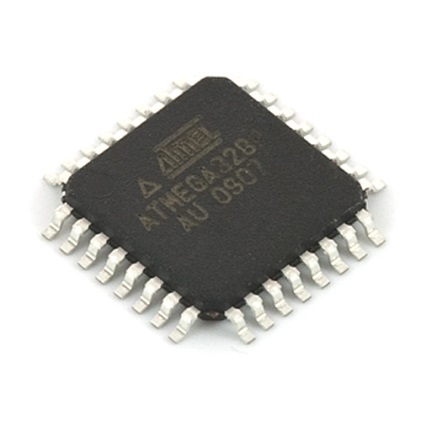
Определим обязательные требования:

* Достаточная производительность для формирования, обработки и анализа информации, а также для взаимодействия с радиомодулями;
* Наличие аппаратного интерфейса SPI для взаимодействия с радиомодулями;
* Наличие аппаратного интерфейса UART для связи с ЭВМ оператора и взаимодействия с модулем GPS/ГЛОНАСС;
* Рабочее напряжение 3.3В;
* Малое энергопотребление (меньше 1мА);
* Рабочий диапазон температур от ;
* Наличие аппаратных прерываний;
* Наличие сторожевого таймера для избежания сбоев в программной части реализации системы;
* Поддержка компилятора высокоуровнего языка для разработки программно-математического обеспечения.

Проведя тщательный анализ рынка, был выбран МК Atmega328P-PU фирмы Atmel, который с запасом удовлетворяет предъявляемым требованиям.

### *Описание Atmega328P-PU*

Atmega328P-PU – это 8 разрядный CMOS микроконтроллер с низким энергопотреблением, основанный на архитектуре AVR. Atmega328P-PU достигает производительности 1MIPS на каждый МГц, что позволяет добиваться хороших соотношение производительности к энергопотреблению.



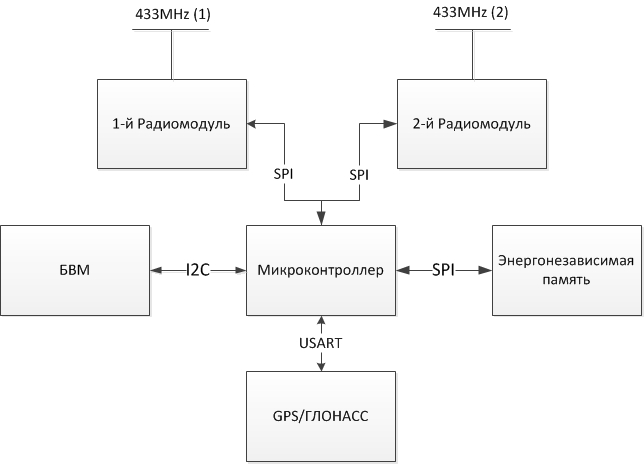
|  |  |
| --- | --- |
| **Характеристика** | **Значение** |
| Архитектура | AVR/8bit |
| Тактовая частота | 0-20МГц |
| Объем flash-памяти | 32кб |
| Объем SRAM-памяти | 2кб |
| Объем EEPROM-памяти | 1кб |
| Напряжение питания | 1.8-5.5В |
| Потребляемый ток в режиме работы (1МГц, 1.8 В) | 0.2мА |
| Потребляемый ток в режиме сна (1МГц, 1.8 В) | 0.75мкА |
| Общее количество портов | 23 |
| Количество PWM выводов | 6 |
| Количество аппаратных USART | 1 |
| Количество аппаратных SPI | 1 |
| Количество аппаратных I2c | 1 |

# Разработка функциональной и принципиальной схем системы взаимодействия и управления группой БПЛА с использованием радиоканала

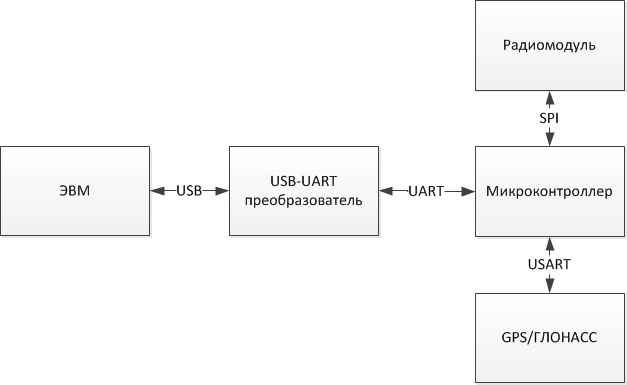
Проанализировав все сказанное в предыдущих главах, имеем 2 аппаратных комплекса:

1. На борту БПЛА. Состоит из двух приемопередающих радиомодулей в связке с микроконтроллером, модулем GPS/ГЛОНАСС, запоминающим устройством и необходимой обвязкой;
2. Базовая станция. Состоит из 1 приемопередающего модуля в связке с микроконтроллером, модулем GPS/ГЛОНАСС, микросхемы и порта USB для обеспечения связи с ЭВМ оператора.

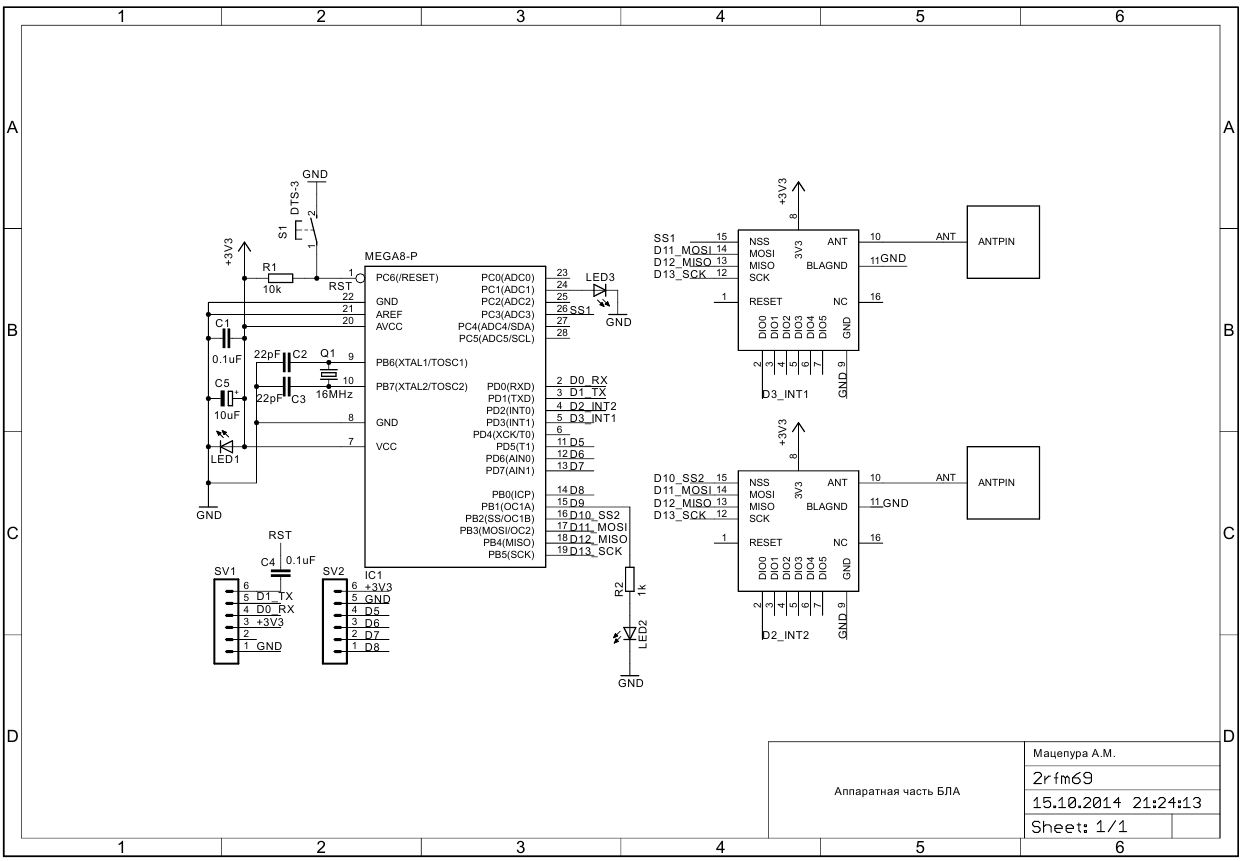
## Функциональная схема модуля на борту БПЛА



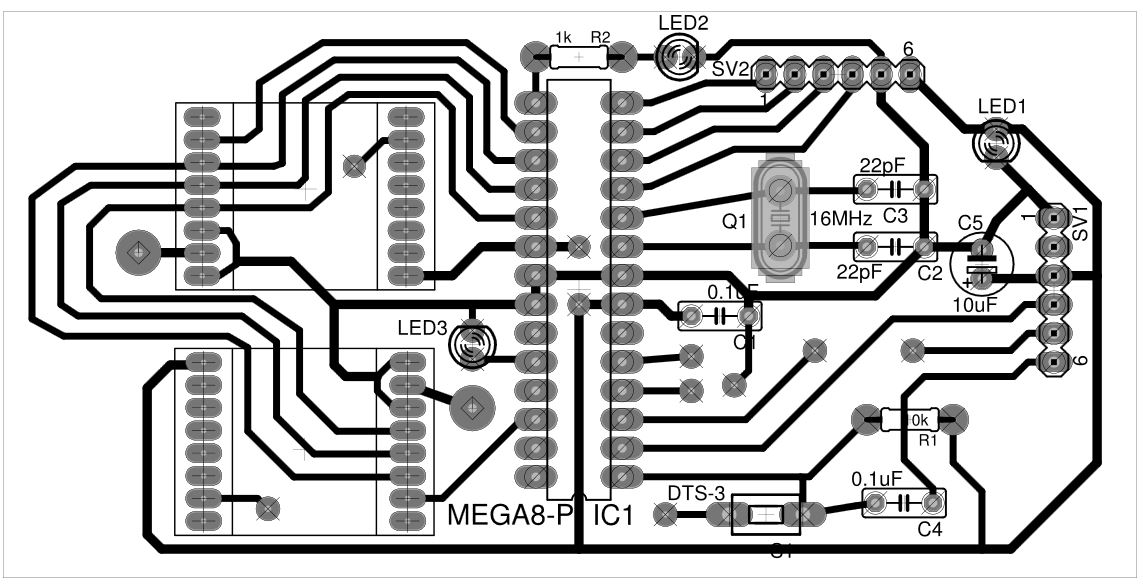
## Функциональная схема устройства сопряжения с оборудованием пункта управления



## Принципиальная схема модуля на борту БПЛА



## Вариант конструктивного исполнения модуля на борту БПЛА



# Разработка программно-математического обеспечения

На основе разработанных алгоритмов было разработано следующее программно-математическое обеспечение:

* ПМО для микроконтроллера устройства сопряжения с оборудованием пункта управления;
* ПМО для микроконтроллера модуля на борту БПЛА;
* Программно-математическое обеспечение для ПЭВМ оператора.

## ПМО устройства сопряжения с оборудованием пункта управления

ПМО устройства сопряжения с оборудованием пункта управления разработано с использованием среды разработки Atmel Studio на языке программирования C.

ПМО включает в себя модули:

* Организации передачи данных от радиомодуля и обратно с помощью протокола SPI;
* Организации взаимодействия с группой БПЛА с использованием радиомодуля с учетом ранее разработанного алгоритма;
* Организации передачи данных от устройства сопряжения к ПЭВМ оператора по протоколу USB с использованием специальной микросхемы;

## Программно-математическое обеспечение модуля на борту БПЛА

ПМО модуля на борту разработано с использованием среды разработки Atmel Studio на языке программирования C.

ПМО включает в себя модули:

* Организации передачи данных от радиомодулей и обратно с помощью протокола SPI;
* Организации взаимодействия с группой БПЛА с использованием радиомодуля с учетом ранее разработанного алгоритма;
* Организация взаимодействия с наземным пунктом управления с учетом ранее разработанного алгоритма.

## Программно-математическое обеспечение ПЭВМ оператора

ПМО для ПЭВМ оператора разработано на языке программирования C++ с использованием библиотеки Qt.

ПМО включает в себя модули:

* Организация взаимодействия с устройством сопряжения посредством виртуального COM-портом;
* Графический интерфейс для удобного ввода/вывода информации.

# Выводы о проделанной работе

На основании задания по преддипломной практике проделана следующая работа:

1. Поставлена задача разработать алгоритмы, программно-математическое и аппаратное обеспечение для управления группой БПЛА с использованием радиоканала;
2. Рассмотрено несколько путей решения поставленной задачи;
3. Разработан алгоритм группового взаимодействия с использованием радиоканала;
4. Разработана функциональная и принципиальная схемы устройства сопряжения с оборудованием наземного комплекса и модуля на борту БПЛА;
5. Разработан вариант конструктивного исполнения модуля на борту БПЛА;
6. Подобрана элементная база, удовлетворяющая всем требованиям для решения поставленной задачи;
7. Разработано программно-математическое обеспечение устройства сопряжения с наземным комплексом, модуля на борту БПЛА, ПЭВМ оператора.

Достигнутые результаты повышают возможность разработки надежной адаптивной системы управления группой БПЛА, а также значительно улучшают показатели энергоэффективности.

# Направления дальнейшей работы

Для завершения разработки комплекса с учетом поставленных задач необходимо выполнить следующие работы:

1. Внедрить в текущие устройства GPS/ГЛОНАСС модуль для получения координат местоположения БПЛА и точного времени;
2. Разработать протокол команд управления для организации взаимодействия БПЛА и наземного комплекса управления;
3. Модернизация конструктивной части для уменьшения габаритов, стабилизации электрических показателей и производства опытного образца;
4. Тестирование, отладка и рефакторинг программно-математического обеспечения;
5. Расчет затрат на разработку и решение поставленной задачи;
6. Анализ необходимых охраны труда и окружающей среды для решения поставленной задачи.

# Список использованных источников

1. Лебедев A.A., Бобронников В.Т., Кра­сильщиков М.Н., Малышев В.В. Статистическая динамика и оптимизация управления летательных аппаратов: Учебное пособие для авиационных специ­альностей вузов – М.: Машиностроение, 1985 — 280 с.
2. Под редакцией М.Н. Красильщикова, Г.Г. Себрякова. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с. – ISBN 978-5-9221-1168-3.
3. Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В. «Прикладные многоагентные системы группового управления», Искусственный интеллект и принятие решений, №2, 2009г.;
4. «Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами», Моисеев В.С., Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования». – 768с.;
5. Бурый А.С., Фомичев И.Д. «Мультиагентные модели управления группами автономных летательных аппаратов», Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования: Научный интернет-журнал, №2(12), 2013г.;
6. Амелин К.С., Антал Е.И., Васильев В.И., Граничина Н.О. «Адаптивное управление автономной группой беспилотных летательных аппаратов», Санкт-Петербургский Государственный Университет, 2009г.;
7. Ефанов В.Н., Мизин С.В., Неретина В.В. «Управление полетом БПЛА в строю на основе координации взаимодействия группы летательных аппаратов», Вестник УГАТУ, с.114-121, №1(62), 2014г.;