

УДК 62-519, 004.418, 004.716

## УДАЛЁННАЯ КОММУНИКАЦИЯ МНОЖЕСТВА ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ С МУЛЬТИАГЕНТНОЙ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ МОБИЛЬНЫХ АВТОНОМНЫХ БТС

А.Р. Гамаюнов (*agamayunov@le-talo.ru*)

Е.М. Притоцкий (*epritotskiy@le-talo.ru*)

П.К. Герасимов (*pgerasimov@le-talo.ru*)

Д.А. Егоров (*degorov@le-talo.ru*)

Владимирский государственный университет  
имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир

**Аннотация.** Статья содержит постановку и решение задачи удаленной коммуникации с мультиагентным комплексом на основе автономных мобильных беспилотных транспортных систем (БТС). Основной акцент сделан на беспилотные летательные аппараты (БЛА), как активно развивающиеся на данный момент вид БТС, хотя приведенные принципы справедливы для всех видов БТС. Проведен обзор основных известных способов передачи информации между БЛА и пунктом управления оператора, выявлены проблемы, не позволяющие решить данную задачу, используя описанные технологии. Предложен и апробирован способ решения задачи, создан проект комплекса, демонстрирующего предложенное решение.

**Ключевые слова:** БТС, БЛА, мультиагентная система, протокол коммуникации, удалённая связь, автономная миссия, передача видеопотока.

### Введение

В настоящее время в области робототехники с увеличением количества БТС всё более актуальной является задача их централизованного управления. Эта задача является логическим развитием мультиагентных систем, аналогично области IoT (Internet of Things) [Ashton, 2009], в которой отдельные блоки управления на прошлом этапе развития объединяли в группу внутри локальной домашней сети, а на данный момент активно развивается направление администрирования и управления этими группами из удаленного пункта управления, как

например в IIoT (Industrial Internet of Things). Система сбора показаний бытовых счётчиков, система анализа технического состояния станков, мониторинга внештатных ситуаций и количества материалов на крупном заводе на данный момент во многих случаях имеет доступ через интернет. Но эти технологии невозможно использовать в области робототехники из-за специфики протоколов и технологий, устоявшихся в этой области, что говорит о возникающей проблеме, которую необходимо решать.

## 1. Обзор

К настоящему времени хорошо исследован процесс коммуникации между пунктом управления и БЛА по радиоканалу. Средствами полудуплексной связи в простейшем случае на БЛА передаются широтно-импульсной модуляции (ШИМ) данных в канале управления, которые могут так же шифроваться фазово-импульсной модуляцией (ФИМ). Данный способ управления позволяет решать множество прикладных задач, управляя беспилотником вручную [Шилов, 2014] (рисунок 1.а).

Компания DJI имеет свой проприетарный полнодуплексный протокол передачи Lightbrige, который позволяет передавать не только базовые команды управления, но и телеметрию, сложные команды построения миссии и цифровой видео сигнал HD качества с задержкой не более 0,4 сек. Однако данный протокол не предусматривает механизма автономного выполнения миссии без связи с базовой станцией, которой служит мобильный телефон [Birnbach, 2017] (рисунок 1.б).

Протокол Micro Aero Vehicle Link (MAVLink) также использует полнодуплексную связь. Он описывает протоколы обмена данными, редактирования миссии и параметров БТС, что даёт возможность автономно выполнять заранее записанную миссию (рисунок 1.в). Протокол предусматривает взаимодействие между многими (до 255) БТС Flight Control Unit (FCU) и базовыми станциями Ground Control Unit (GCU) внутри сети, что должно быть достаточно при использовании радиоканала для передачи данных. Данный протокол часто используется совместно с первым вариантом полудуплексной связи при ручном управлении. Поскольку MAVLink также имплементирует базовые команды управления, он может использоваться и для ручного управления, например, через подключённый к базовой станции джойстик или используя виртуальный джойстик на экране базовой станции [Meier, 2011].

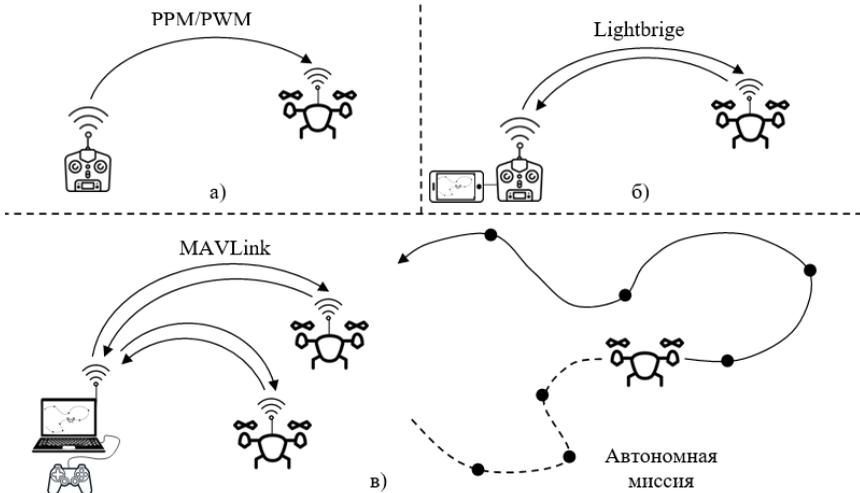


Рис. 1. Способы управления БЛА

Описанные выше варианты коммуникации предполагают передачу данных по радиоканалу, что не позволяет на их основе строить систему управления распределёнными БТС. Стоит отметить, что существует ПО (QGroundControl, MAVproxy, MAVros и др.), позволяющее передавать протокол MAVLink по TCP или UDP, что даёт возможность создавать удалённый канал управления через интернет, если на одной из сторон имеется статический IP адрес, как показано на рисунке 2.а [Alejo, 2015]. При этом для передачи данных используется сеть интернет (либо локальная сеть), доступ к которой базовая станция может получить через GSM сеть, что существенно повышает её мобильность, а клиент может подключиться из любой точки земли. При таком виде коммуникации накладные задержки канала передачи данных на текущем уровне качества мобильной связи не позволяют управлять БТС полностью вручную. Однако данная особенность не критична при редактировании настроек, полуручном управлении через задание точки перемещения, передачей данных и миссии, поскольку протокол MAVLink предусматривает проверку переданных данных на верхнем уровне. Существует возможность создания канала управления, если на клиенте и на базовой станции нет статического адреса, используя промежуточный прокси-сервер с известным статическим адресом, на котором по туннелю Secure Shell (SSH) прокинуты порты одного из участников информационного обмена, как показано на рисунке 2.б.

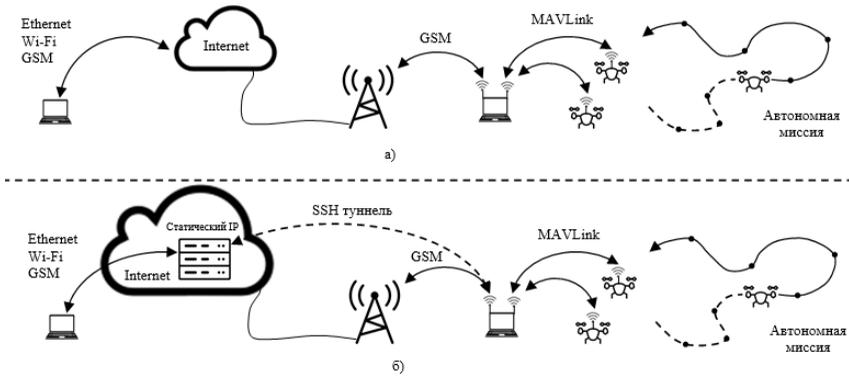


Рис. 2. Способы удалённо управления

Однако описанные выше средства коммуникации не позволяют взаимодействовать одновременно с несколькими удалёнными БТС и не предоставляют доступ множеству клиентов, что не позволяет создавать коммуникацию между распределёнными агентами с разделением доступа. Также проблемой является несовместимость двух самых распространённых протоколов управления БТС: MAVLink и DJI. Для решения этих проблем, необходимо решить следующие задачи:

Задача 1 – описать протокол верхнего уровня, позволяющий унифицировать взаимодействие с агентами, использующими наиболее распространённые протокол управления - MAVLink или DJI,

Задача 2 – предложить способ доступа к БТС множеству клиентов и механизм разделения доступа между ними,

Задача 3 – предложить способ расширения набора данных передаваемых клиенту.

Решая данные задачи, можно получить универсальный инструмент для одновременного управления большим количеством территориально распределённых БТС с целью решения глобальных задач по автоматическому планированию траекторий для навигации БТС [Яковлев, 2015] и совершенствованию алгоритмов, позволяющих организовать роевое взаимодействие в группе агентов [Varela, 2003].

## 2. Универсальный протокол

Не смотря на различия протоколов DJI и MAVlink, сами БЛА имеют практически идентичные примитивы управления и общую функциональность. Они являются достаточно «гибкими», поскольку

рассчитаны на БЛА различных моделей, что проявляется в множестве опциональных параметров вызова команд управления. Обмен обязательными сообщениями такими как heartbeat в MAVLink и служебными сообщениями в dji обеспечивают посредники - MAVros и DJI SDK, к которым имеется доступ через ROS API и DJI API соответственно. Эти интерфейсы можно использовать для получения доступа к телеметрии и управлению БЛА, но они не только платформозависимые, но и перенимают ограничения протоколов нижнего уровня. Например, при создании миссии, в DJI запрещено указывать точку перемещения ближе, чем 1 метр от предыдущей точки, а в MAVLink действия при выполнении миссии, такие как «изменить угол наклона камеры» или «сделать фото», считаются отдельными точками, которые можно указать с одинаковыми координатами.

Реализация протоколов отличается и на аппаратном уровне. Для получения доступа к API ROS необходим одноплатный компьютер с ОС LINUX – так называемый компьютер «компаньон», подключаемый к полётному контроллеру через Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) и находящийся на борту БЛА. DJI API рассчитан на использование на мобильном телефоне Android, подключаемому к передатчику Lightbridge, которым обычно служит пульт ручного управления дроном, однако вместо мобильного телефона или планшета можно использовать одноплатный компьютер «компаньон» с ОС Android.

Для решения задачи создания универсального протокола необходимо создать программы-трансляторы из описываемого протокола в вызовы DJI API и ROS API. Для DJI API это будет программа на языке Java, для ROS API на языке Python или C++. Назовём данные программы Icommander1 и Icommander2 соответственно, как показано на рисунке 3.

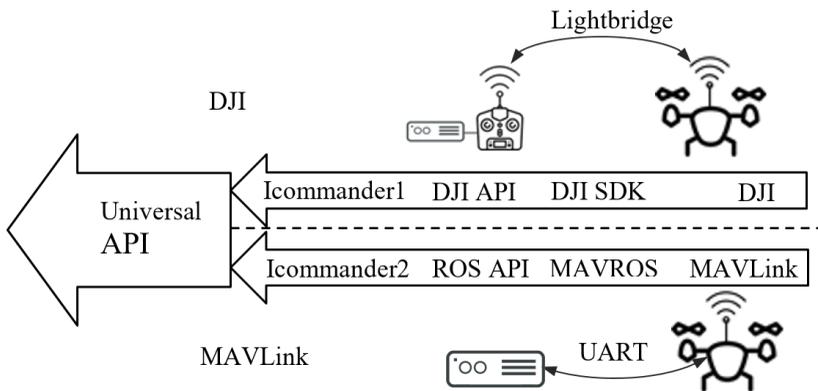


Рис. 3. Формирования универсального интерфейса

Поскольку в программе-трансляторе используется описание бизнес-логики и никаких емких вычислений, то для ROS API рациональнее использование более высокоуровневый язык программирования Python. Эти программы реализуют API с единой сигнатурой вызова функций, что позволяет реализовывать алгоритмы управления БТС независимо от различий моделей беспилотников. Краткое описание протокола представлено в таблице 1. Сообщения передаются по TCP-сокету, что позволяет создавать постоянное соединение в рамках одной сессии и даёт определённую гарантию доставки данных.

Таблица 1

## Описание протокола

Сообщение	Содержание	Описание	Частота отправки
drone-connect	drone_id, name, video	Служит для идентификации БТС и получения ссылки на видео поток.	Однократно при подключении Icommander к клиенту.
drone-telemetry	latitude, longitude, altitude, direction, rssi	Данные телеметрии о глобальных координатах, направлении и уровне сигнала БТС	Не менее 1 сообщения в сек. от Icommander к клиенту
drone-battery	percentage, current, voltage, cells	Данные о напряжении, потребляемом токе и количестве ячеек аккумулятора БТС	Не менее 1 сообщения в сек. от Icommander к клиенту
drone-state	Armed, mode	Данные о текущем режиме работы БТС	Не менее 1 сообщения в сек. от Icommander к клиенту
mission-push	Settings [speed, yaw_strategy, and finish], points [latitude, longitude, altitude, current, actions [wait, pitch, rotate, take_photos, start_video, stop_video...]....] ]	Миссия для автономного выполнения БТС	Однократно от клиента к Icommander
mission-status	Settings [speed, yaw_strategy, and finish], points [latitude, longitude, altitude, current, actions [wait, pitch, rotate, take_photos, start_video, stop_video...]....] ]	Копия миссии для подтверждения получения от клиента и контроля выполнения	При изменении статуса миссии

remote_stick	x,y,z,yaw	Сообщение для ручного управления БЛА при малых задержках сети	При изменении положения органов управления на клиенте
go_to_point	latitude, longitude, altitude	Альтернативный способ ручного управления при больших задержках сети	При указании координат точки клиентом

### 3. Способ множественного доступа

Описанный выше протокол предоставляет универсальный интерфейс управления группой БТС одним клиентом, с которым идёт обмен сообщениями. Для предоставления доступа управления многим пользователям коммуникация должна вестись через посредника, которым выступает виртуальный сервер, в задачи которого так же входит задача разделения доступа. Сервер по сути является одним клиентом, который имеет доступ к управлению всеми подключёнными к нему БТС. Согласно протоколу сервер при подключении БТС получает уникальный идентификационный номер DroneID. Задачу разделения доступа можно решить, введя регистрацию UserID при подключении клиента к серверу управления. Таким образом при хранении в базе данных этих идентификаторов и сопоставлением их между собой можно манипулировать уровнями доступа к управлению БТС разными клиентами. При этом клиенты могут получать доступ к системе управления распределёнными БТС через обычный веб интерфейс, что избавляет от проблемы платформозависимого приложения, как показано на рисунке 4.



Рис. 4. Архитектура системы управления

#### 4. Передача фото/видео

Предложенный выше протокол предоставляет канал управления и передачу данных телеметрии, однако при этом остаётся не решённым вопрос передачи одного из наиболее важных видов информации - фото/видео материала, позволяющего ориентироваться оператору БТС в пространстве и принимать решения при ручном или полуручном способе управления. Для постобработки полётных данных можно предложить добавить в описанный протокол сообщения, содержащие фотоматериал, однако эти данные будут передаваться с большой задержкой, так как займут большую часть канала передачи данных через сеть GSM, что увеличит задержку передачи данных телеметрии и управления. Для решения данной задачи рациональнее использование одного из способов транслирования сжатого видеопотока через видеосервер. Это позволит снизить требования к каналу передачи данных, поскольку видеопоток в этом случае передаётся по отдельному каналу и в зависимости от качества канала передачи данных может динамически изменять битрейт видеопотока. Способ передачи видеопотока через видеосервер позволит использовать стандартные инструменты управления видеопотоками, такими как запись, хранение, предоставление доступа множеству клиентов, разделение доступа, перекодирование и т.п. Видеопоток при передаче кодируется кодеком h.264 на компьютере-компаньоне БТС, упаковывается в контейнер AVI, и передаётся по протоколу Real Time Messaging Protocol (RTMP) на видеосервер, как показано на рисунке 5. Далее сервер управления БТС получает ссылку на видеопоток, которую предоставляет авторизованным клиентам. При наличии функции Digital Video Recorder (DVR) на сервере, как у Simple RTMP Server (SRS), видеосервер может параллельно вести запись видеопотока на жесткий диск.

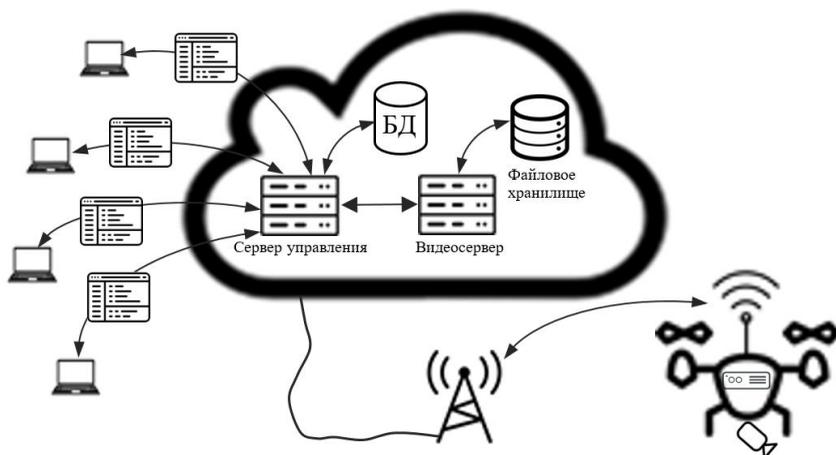


Рис. 5. Трансляция и запись видеопотока

## Заключение

Несмотря на то, что в данной статье для примера были использованы БТС на основе беспилотных летательных аппаратов, предложенный способ коммуникации применим ко всем видам БТС.

В связи с активным развитием теории группового взаимодействия БТС, предложенный способ коммуникации может быть использован исследователями как инструмент для реализации теоретических разработок группового управления, в том числе при групповом управлении БТС с элементами искусственного интеллекта, как виртуальными БТС в режиме Software in the Loop (SITL), так и настоящими.

Предложенный способ удалённого управления был реализован в комплексе авторами статьи и опробован для нужд Главного управления МЧС по Владимирской области, где показал возможность применения описанного инструмента в практических целях. В ходе испытаний был получен устойчивый удаленный канал связи оператора с БЛА на расстоянии более 10 км. Оператор задавал маршруты для автономного выполнения миссии, управлял БЛА в ручном режиме через интернет и произвел разведку местности на наличие очагов возгорания. Разработанный комплекс для автономного мониторинга местности был представлен в рамках X Международного салона средств обеспечения безопасности «Комплексная безопасность – 2017» [МЧС, 2017].

## Список литературы

- [Ashton, 2009] Ashton K. That ‘Internet of Things’ Thing. In the real world, things matter more than ideas // RFID Journal, 2009.
- [Шилов, 2014] Шилов К. Е. Разработка системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом мультироторного типа // ТРУДЫ МФТИ, 2014. — Том 6, № 4. – С. 139-152.
- [Birnbach, 2017] Birnbach S., Baker R., Martinovic I. Wi-Fly?: Detecting Privacy Invasion Attacks by Consumer Drones. NDSS 2017: Network and Distributed System Security Symposium.
- [Meier, 2011] Meier L., Tanskanen P., Fraundorfer F., Pollefeys M. The PIXHAWK open-source computer vision framework for MAVs // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, 2011 ISPRS Zurich 2011 Workshop, 14-16 September 2011, Zurich, Switzerland.
- [Alejo, 2015] Alejo D., del Arco J. C., Arrue B. C., Cobano J.A., Heredia G., Ollero A. Multi-UAV ground control station for gliding aircraft // 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2015, Torremolinos, Spain.
- [Яковлев, 2015] Яковлев К. С., Баскин Е. С., Андрейчук А. А. Метод автоматического планирования совокупности траекторий для навигации беспилотных транспортных средств // Управление большими системами, 2015, Выпуск 58, С. 306-342.
- [Varela, 2003] Varela G., Saamaño P., Orjales F., Deibe A., López-Peña F., Duro R. J. Swarm Intelligence based Approach for Real Time UAV Integrated // IEEE, Group for Engineering Research University of A Coruña Ferrol, 2003, Spain.
- [МЧС, 2017] ГУ МЧС по Владимирской области, Пресс-центр. - <http://33.mchs.gov.ru/pressroom/news/item/5406387>