Обзорная статья
УДК 004.75:519.687.1+004.056+623.746.4-519
ББК 32.971.353
Д 58
DOI: 10.53598/2410-3225-2022-3-306-69-76

Разработка системы расширения дальности полета беспилотного летательного аппарата с помощью технологии беспроводной связи LoRa

(*Рецензирована*)

Виталий Анатольевич Довгаль[1], Кадыр Абедин Османи[2]

[1] *Майкопский государственный технологический университет, Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия, urmia@mail.ru*
[2] *Адыгейский государственный университет, Майкоп, Россия, kadir.superadiga@yandex.ru*

Аннотация. *Рассматриваются основные принципы обеспечения связи беспилотного летательного аппарата с наземным комплексом управления. Проанализированы конкретные требования по обеспечению связи с дроном в зависимости от способа его применения в различных областях и выявлены основные проблемы обеспечения связи между дронами и наземными станциями. Для расширения дальности управляемого полета разработана общая схема решения на основе ретрансляции сигнала с помощью технологии связи LoRa, программируемой платы Arduino Nano и радиомодуля передачи данных Ra-01. Описан алгоритм обработки потока данных в режиме прямой связи и ретрансляции пакетов телеметрии.*

Ключевые слова: *беспроводные сети, Интернет вещей, беспилотные летательные аппараты, дальность полета дрона, микроконтроллер*

Review Paper

Development of a system for extending the flight range of an unmanned aerial vehicle using LoRa wireless communication technology

Vitaliy A. Dovgal[1], Kadyr A. Osmani[2]

[1] *Maikop State University of Technology, Adyghe State University, Maikop, Russia, urmia@mail.ru*
[2] *Adyghe State University, Maikop, Russia, kadir.superadiga@yandex.ru*

Abstract. *The article discusses the basic principles of ensuring the communication of an unmanned aerial vehicle (UAV) with a ground control system. The specific requirements for providing communication with a drone, depending on the way it is used in various fields, are also analyzed and the main problems of providing communication between drones and ground stations are identified. To extend the range of controlled flight, a general scheme of a solution based on signal retransmission using LoRa communication technology, the Arduino Nano programmable board and the Ra-01 radio transmission module has been developed. The paper describes an algorithm for processing a data stream in the mode of direct communication and retransmission of telemetry packets.*

Keywords: *wireless networks, Internet of Things, unmanned aerial vehicles, drone flight range, microcontroller*

Введение

Одной из характеристик обеспечения качественного выполнения заданной миссии беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) является зона охвата местности, которая иногда может быть весьма велика. Поэтому для выполнения условий миссии летательному аппарату может понадобиться выйти за пределы устойчивой связи для его

управления. Для предотвращения потери летательного аппарата необходимо расширить дальность полета БПЛА, увеличив зону устойчивой связи [1].

Цель исследования заключается в изучении и анализе возможностей по обеспечению расширения зоны устойчивой связи между БПЛА и наземной станцией. Объектом исследования является система связи беспилотного летательного аппарата.

Практическая значимость работы заключается в возможности реализации специализированного модуля связи для беспилотных летательных аппаратов с применением технологии LoRa для полета на дальние расстояния.

1. Принципы и требования обеспечения связи для управления беспилотным летательным аппаратом

Беспроводная связь является важнейшей технологией, позволяющей использовать беспилотную авиационную систему (БАС). С одной стороны, для обеспечения безопасной, надежной и эффективной работы в полете дроны должны обмениваться критично важной для безопасности информацией с различными сторонами, такими как удаленные пилоты, находящиеся поблизости другие летательные аппараты и авиадиспетчеры. Такой вид связи широко известен как управление и связь без полезной нагрузки (control and non-payload communication, CNPC) [2]. С другой стороны, в зависимости от решаемых задач дрон нуждается в своевременной передаче и/или получении связанных с миссией данных, таких как аэрофотоснимки, высокоскоростное видео и пакеты данных для ретрансляции на/от различных наземных объектов, таких как операторы БПЛА, пользователи или наземные шлюзы и т.д. Такой вид связи известен как коммуникация полезной нагрузки.

CNPC обычно имеет низкую скорость передачи данных, порядка Кбит/с (килобит в секунду), но предъявляет довольно строгие требования к высокой надежности и малой задержке. В свою очередь требования к данным полезной нагрузки сильно зависят от приложения. Например, поисково-спасательные работы должны быть обеспечены скоростью передачи данных 300 Кбит/с по нисходящему потоку и 6 Мбит/с по восходящему. Потеря канала связи без полезной нагрузки может привести к катастрофическим последствиям. Международная организация гражданской авиации (ICAO) определила, что каналы связи без полезной нагрузки для беспилотного летательного аппарата должны работать в защищенном авиационном спектре [3, 4].

По сравнению со связью без полезной нагрузки связь полезной нагрузки БПЛА обычно требует гораздо более высокой скорости передачи данных. Например, для обеспечения передачи видео высокой четкости (FHD) с БПЛА наземному пользователю скорость передачи составляет порядка нескольких Мбит/с, а для видео 4K она превышает 30 Мбит/с. Требования к скорости для БПЛА, выступающего в качестве платформы для воздушной связи, могут быть еще выше, например, до десятков Гбит/с для приложений пересылки/передачи данных.

2. Анализ проблем, возникающих у БПЛА при проектировании систем дальнего действия связи

Основными проблемами, возникающими у БПЛА для обеспечения устойчивой связи, являются:

• обеспечение радиовидимости между беспилотником (БПЛА) и наземной станцией;

• компенсация уменьшения силы сигнала на трассе.

Линия прямой видимости между самолетом и наземным комплексом управления может быть достигнута за счет увеличения высоты полета самолета и увеличения угла места наземной антенны. Передача информации на расстояния более 300 км возможна с использованием ретрансляционной аппаратуры, систем спутниковой связи, стацио-

нарных систем передачи данных.

Как правило, максимальное расстояние прямой радиосвязи между гражданским БПЛА и наземной станцией сегодня составляет не более 100 км. Для командно-телеметрической связи на большие расстояния возможно использование спутниковой связи. При этом поток данных ограничивается минимально необходимой информацией о состоянии БПЛА, интервал передачи которой может составлять, например, от 300 до 3000 мс.

Рассмотрим потенциальные ситуации взаимного расположения БПЛА и наземной станции (рис. 1) [5]. Увеличение дальности связи традиционно обеспечивается увеличением расстояния до радиогоризонта для наземных и бортовых антенн. Если пренебречь влиянием различных видов атмосферной рефракции, то максимальная дальность радиосвязи определяется суммой дальностей радиогоризонта для антенны наземного комплекса управления (НКУ) и дрона. На рисунке 1 показано условное разбиение участков воздушного пространства:

- зона освещенности – пространство, в котором осуществляется уверенный прием управляющего сигнала от НКУ;
- зона полутени – пространство, в котором прием управляющего сигнала от НКУ может осуществляться только за счет дифракции вокруг земного шара (в ней находится БПЛА № 1);
- зона тени – пространство, в котором прием управляющего сигнала от НКУ не возможен, и связь с дроном теряется;

Рис. 1. Зоны освещенности, полутени и тени сигнала НКУ

Fig. 1. Areas of illumination, semi-shade and shadow of signal from a ground control system (GCS)

Причем максимальная дальность радиосвязи зависит от высоты антенны НКУ и высоты полета БПЛА. Очевидно, что не всегда можно значительно увеличивать указанные параметры (в силу разных причин, в том числе и скрытности выполнения миссии). Именно поэтому необходимо предложить альтернативный способ расширения дальности полета беспилотника, обеспечивающего возможность передачи информации с высокой скоростью.

3. Общая схема решения для обеспечения связи с применением технологии Long Range (LoRa)

Среднестатистические коммерческие беспилотники для передачи управляющей информации используют способ передачи «прямая связь» (наземная станция – БПЛА), которая выполняется по схеме, представленной на рисунке 2.

Для расширения зоны устойчивой связи дрона с наземным комплексом управления по сравнению с обычной связью была разработана специальная схема передачи информации, представленная на рисунке 3: имеется наземная станция, которая ведет

прием телеметрии и корректировки положения БПЛА, у которой радиус связи R1 является ограничением по дальности связи. Один из трех беспилотных аппаратов выходит из радиуса видимости радиосвязи.

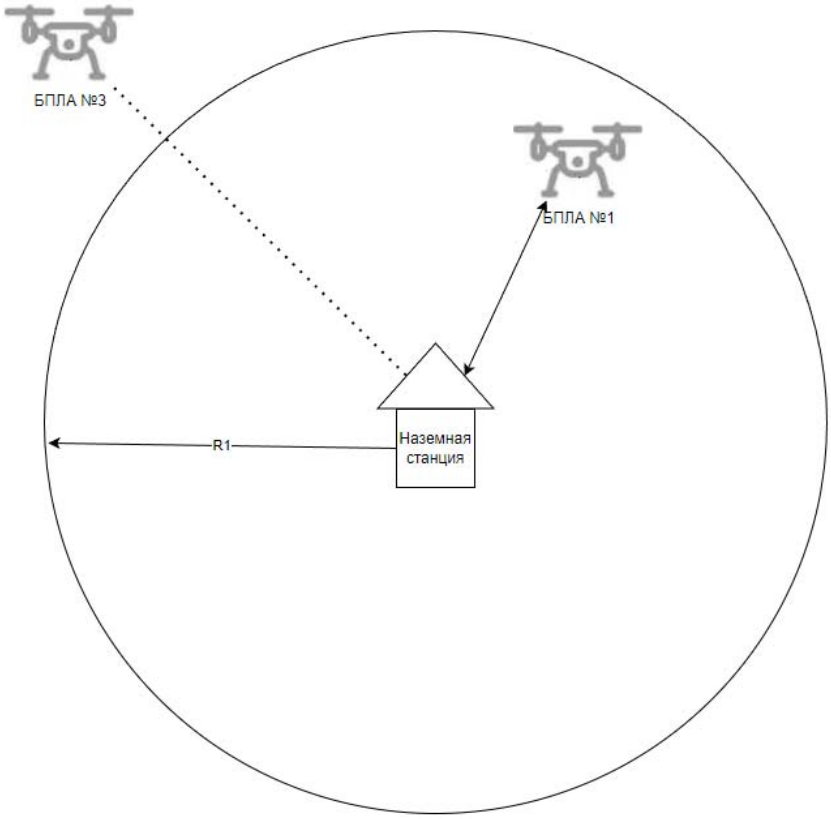

Рис. 2. Схема связи наземной станции с БПЛА

Fig. 2. Diagram of communication between a ground station and UAV

Так как связь с БПЛА всегда ограничена радиусом R1 (и иными препятствиями типа горной местности и городских условий) и данный радиус нельзя увеличивать до предела в связи с радиогоризонтом, то возникает необходимость дополнительной системы связи для ретрансляции потока данных с беспилотника на наземную станцию (НС – Ретранслятор – БПЛА). Сама система связи может работать в двух режимах:

1. Режим ретрансляции (НС – Ретранслятор – БПЛА), при котором система связи является посредником между беспилотным летательным аппаратом и наземной станцией. Ретрансляция сигнала увеличивает дальность связи дрона на радиус самой связи наземной станции, добавляя свою площадь дальности связи, что позволяет беспилотнику преодолевать более длинные дистанции, чем в случае способа «прямая связь» (рис. 2). Режим ретрансляции работает только тогда, когда система не обнаруживает подключение к полетному контролеру БПЛА либо подключение наземной станции, либо подключена система автономного питания.

2. Режим прямой связи (НС – БПЛА), обеспечивающий связь с беспилотником напрямую без посредника. Дальность передачи данных с БПЛА в этом режиме ограничена мощностью модуля связи, но задержка в данном режиме минимальна по сравнению с режимом ретрансляции. Данный режим включается при подключении системы связи и к наземной станции, и к беспилотному аппарату.

Для расширения радиуса связи можно использовать технологию связи LoRa (Long Range), разработанную компанией Semtech и являющуюся де-факто беспроводной платформой Интернета вещей (IoT). Чипсеты LoRa подключают датчики к облаку и обеспечивают передачу данных и аналитики в режиме реального времени, которые мо-

гут быть использованы для повышения эффективности и производительности. Устройства LoRa и на основе использования метода модуляции LoRa в беспроводных сетях LPWAN, и открытого протокола стандарта LoRaWAN позволяют создавать интеллектуальные приложения IoT, которые позволяют расширить дальность использования интеллектуальных датчиков, их низкое энергопотребление и безопасную передачу данных.

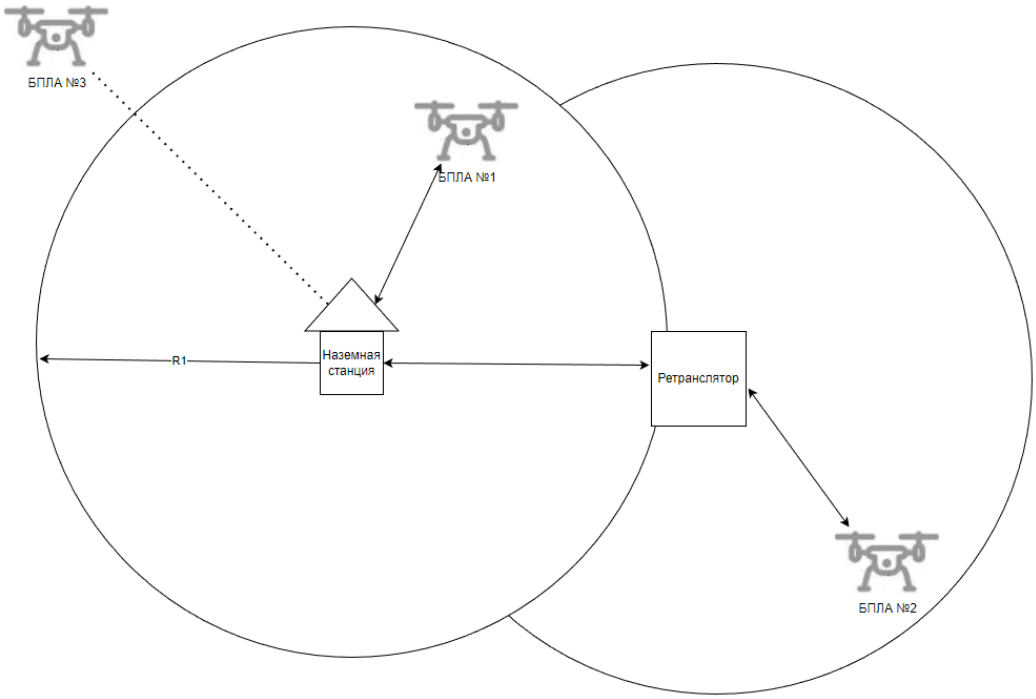

Рис. 3. Схема связи наземной станции с БПЛА через Ретранслятор

Fig. 3. Diagram of communication between a ground station and UAV via Retransmitter

Метод модуляции LoRa основан на расширении спектра SSM (spread spectrum modulation) и вариации линейной частотной модуляции CSS (chirp spread spectrum) с интегрированной прямой коррекцией ошибок FEC (forward error correction), при которой данные кодируются широкополосными импульсами с частотой, увеличивающейся или уменьшающейся на некотором временном интервале. Такое решение, в отличие от технологии прямого расширения спектра, делает приемник устойчивым к отклонениям частоты от номинального значения и упрощает требования к тактовому генератору, что позволяет использовать недорогие кварцевые резонаторы в модулях LoRa. Технология LoRa работает в нелицензированных частотных диапазонах: 868 МГц в Европе, 915 МГц в США и 433 МГц в Азии (в России 433 МГц) [7].

4. Разработка спецификации аппаратно-программных решений для реализации системы расширения дальности

В целях реализации системы расширения связи между беспилотным летательным аппаратом и НКУ был выбран микроконтроллер Arduino Nano V3, который позволяет реализовать автономную работу в режиме ретрансляции данных с полетного контроллера на наземную станцию (НС – Ретранслятор – БПЛА), а также в режиме прямого соединения (НС – БПЛА).

Микроконтроллер Arduino Nano представляет собой микроконтроллер на базе ATMega 328P, включающий 22 порта ввода/вывода, из которых: 8 аналоговых; 1 последовательный; 1 USB-порт и др. Программирование контроллера через встроенный загрузчик осуществляется с помощью специализированного программного обеспечения Arduino Software IDE.

В качестве передатчика и приемника сигнала (данных телеметрии) под Arduino был выбран специализированный модуль с поддержкой технологии связи LoRa Ra-01, представляющий собой модуль беспроводной передачи данных с технологией расширенного спектра на приемопередатчике Semtech SX1278 и обеспечивающий расстояние связи до 10 км. Трансивер Ra-01 обладает высокой помехоустойчивостью, имеет низкое энергопотребление и может работать в диапазоне частот от 410 до 525 МГц (рабочая частота выбирается программным способом), благодаря чему при отсутствии прямой видимости между передатчиком и приемником модуль обеспечивает более стабильную связь, чем 2,4 ГГц приемопередатчики.

Для приема данных системы связи дрона важно задействовать полетный контролер, в качестве которого можно использовать, например, Pixhawk, имеющий открытое программное обеспечение ArduPilot [8]. Pixhawk представляет собой микроконтроллер на базе ядра ARM Cortex M4, STM32F427, а так же он имеет дополнительный аналогичный микроконтроллер на случай отказа основного контролера. Кроме того полетный контролер имеет на борту гироскоп, акселерометр, магнитометр, барометр, а также разъем под GPS для точного позиционирования беспилотного аппарата. Полетный контроллер Pixhawk содержит встроенный загрузчик, который дает возможность загружать в память новый код (либо обновлять программное обеспечение) без использования дополнительных аппаратных решений (например, программатора).

С помощью среды разработки Arduino IDE [9] было разработано программное обеспечение системы расширения дальности связи пары НКУ – дрон. Алгоритм приема/передачи данных телеметрии представлен на рисунке 4.

На рисунке показаны следующие основные этапы работы алгоритма.

1. Настройка модуля LoRa и контролера ATMega328p – этап, позволяющий осуществить настройку и инициализацию модуля LoRa Ra-01, инициализировать пины (RESET, DIO0 и SS), а также установить частоту шины SPI. В случае неудачи инициализации модуля Ra-01 программа прекращает свою работу. Кроме того, этап позволяет настроить последовательный интерфейс (Serial) чипа микроконтроллера ATMega328p, скорость которого устанавливается стандартной – 9600 бод.

2. Условие подключения Serial – этап, осуществляющий проверку подключения к микроконтроллеру наземной станции, либо полетного контролера дрона по шине UART (Serial). Подключение к микроконтроллеру происходит по кантатам 0(TX) и 1(RX) на контролере Ардуино. Если UART «видит» поток данных по его шине, то контролер переходит на следующий третий этап (режим) работы. При отсутствии данных на шине UART алгоритм переходит на четвертый этап выполнения программы.

3. Прямой прием/передача данных телеметрии (земля-воздух) – этап, реализуемый при подключении шины Serial и осуществляющий проверку связи. При наличии связи пакеты данных телеметрии принимаются/отправляются на наземную станцию управления, либо на беспилотный летательный аппарат.

4. Ретрансляция данных телеметрии (земля – ретранслятор – воздух) – этап, реализуемый в том случае, если шина Serial не подключена. На данном этапе проверяется наличие связи как с наземной станцией, так и с дроном. При отсутствии связи осуществляется попытка смены частоты связи. В случае удачной попытки происходит прием/передача с дроном, а затем с наземной станцией.

5. Блок проверки завершения полета – позволяет закольцевать выполнение алгоритма: если полет еще продолжается, то программа переходит к этапу 2, в противном случае (если полет уже завершен), то прекращается вещание в радио-модуль LoRa Ra-01 и выключается система связи.

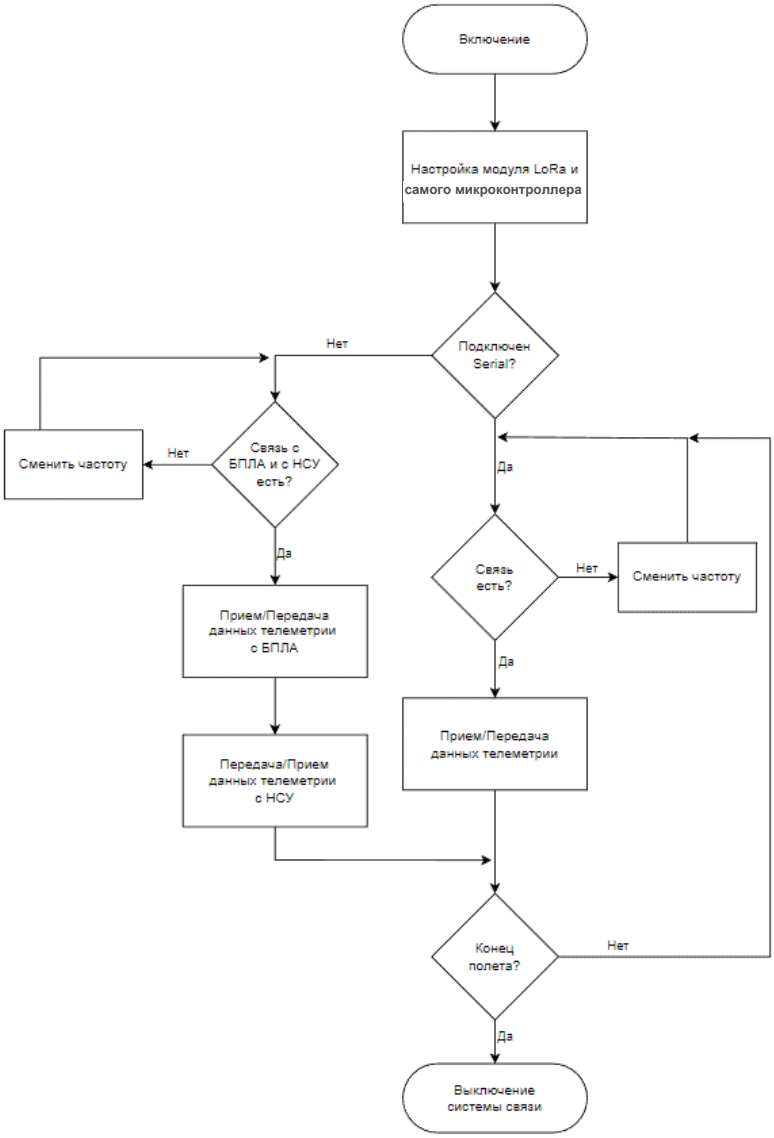

Рис. 4. Алгоритм приема/передачи/ретрансляции данных телеметрии между НКУ и БПЛА

Fig. 4. Algorithm for receiving/transmitting/relaying telemetry data between GCS and UAV

Заключение

В данном исследовании рассмотрена возможность расширения дальности полета беспилотного летательного аппарата с помощью ретрансляции сигнала на основе технологии связи LoRa. В качестве аппаратно-программных решений выбрана программируемая плата Arduino Nano и радиомодуль передачи данных на технологии LoRa Ra-01. Применение технологии LoRa позволяет расширить дополнительную дальность управляемого полета до 15–20 км.

Примечания

1. Dovgal V.A. Decision-Making for Placing Unmanned Aerial Vehicles to Implementation of Analyzing Cloud Computing Cooperation Applied to Information Processing // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111975

2. ITU. Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace // International Telecommunication Union. Tech. Rep.

M2171. 2009. Dec. 83 p.
3. Kerczewski R.J., Wilson J.D., Bishop W.D. Frequency spectrum for integration of unmanned aircraft // Proc. IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2013. Oct. DOI: 10.1109/DASC.2013.6719706
4. Carlos C. Spectrum management issues for the operation of commercial services with UAVs. URL: https://ssrn.com/abstract=2944132 (access date: 1/09/2022)
5. Боев Н.М. Анализ радиолиний связи с беспилотными летательными аппаратами. URL: https://uav-siberia.com/en/news/analiz-radioliniy-svyazi-s-bespilotnymi-letatelnymi-apparatami/ (дата обращения: 1.09.2022)
6. What Is LoRa®? URL: https://www.semtech.com/lora/what-is-lora (access date: 1/09/2022)
7. LoRa PHY | Semtech. URL: https://www.semtech.com/lora/what-is-lora (access date: 1/09/2022)
8. Pixhawk Overview. URL: https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html (access date: 1/09/2022)
9. Среда разработки Arduino | Аппаратная платформа Arduino. URL: https://arduino.ru/Arduino_environment (дата обращения: 1.09.2022)

References

1. Dovgal V.A. Decision-Making for Placing Unmanned Aerial Vehicles to Implementation of Analyzing Cloud Computing Cooperation Applied to Information Processing. 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Sochi, Russia, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111975
2. ITU. Characteristics of unmanned aircraft systems and spectrum requirements to support their safe operation in non-segregated airspace // International Telecommunication Union. Tech. Rep. M2171. 2009. Dec. 83 p.
3. Kerczewski R.J., Wilson J.D., Bishop W.D. Frequency spectrum for integration of unmanned aircraft // Proc. IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference (DASC). 2013. Oct. DOI: 10.1109/DASC.2013.6719706
4. Carlos C. Spectrum management issues for the operation of commercial services with UAVs. URL: https://ssrn.com/abstract=2944132 (access date: 1/09/2022)
5. Boev N.M. Analysis of radio communication links with unmanned aerial vehicles. URL: https://uav-siberia.com/en/news/analiz-radioliniy-svyazi-s-bespilotnymi-letatelnymi-apparatami/ (access date: 1/09/2022)
6. What Is LoRa®? URL: https://www.semtech.com/lora/what-is-lora (access date: 1/09/2022)
7. LoRa PHY | Semtech. URL: https://www.semtech.com/lora/what-is-lora (access date: 1/09/2022)
8. Pixhawk Overview. URL: https://ardupilot.org/copter/docs/common-pixhawk-overview.html (access date: 1/09/2022)
9. Arduino development environment | Arduino hardware platform. URL: https://arduino.ru/Arduino_environment (access date: 1/09/2022)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 27.08.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 17.09.2022.

The article was submitted 27.08.2022; approved after reviewing 16.09.2022; accepted for publication 17.09.2022.

©В.А. Довгаль, К.А. Османи, 2022