

МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ КОНТРОЛЛЕРОВ SDN В СЕТИ БПЛА

**М. В. Модель, В. Н. Коваленко*,
А. Н. Волков, А. С. А. Мутханна**

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: kovalenkovadim1996@gmail.com

Аннотация—Предмет исследования. Разделение выполняемых функций между всеми БПЛА одного кластера, сравнение способов реализации контроллера SDN в сеть БПЛА, описание последовательности действий, реализуемых в кластере БПЛА в зависимости от определенного сценария применения. **Метод исследования.** Анализ стандартов и рекомендаций в области технологий SDN и построения сетей БПЛА; сравнение способов реализации SDN контроллера: вне кластера, на головном узле, на всех БПЛА одного кластера и реализация с использованием двух контроллеров (один вне кластера, а второй на головном узле). **Основные результаты.** Подробно описаны 4 способа применения БПЛА, а также последовательность выполняемых кластером БПЛА действий при каждом способе; Сравнены 4 способа реализации контроллера SDN в сети БПЛА; Представлен способ разделения выполняемых функций между БПЛА одного кластера. **Практическая значимость.** Представленные для каждого способа применения последовательности действий, позволят в будущем реализовать выполнение данных сценариев с использованием кластера БПЛА; в статье подробно описаны преимущества и недостатки всех четырех способов реализации контроллера SDN; представленный способ разделения функций между БПЛА обладает меньшими затратами ресурсов на отдельных БПЛА и на всем кластере в целом, чем при способе с реализацией всех функций на каждом БПЛА кластера.

Ключевые слова—БПЛА, сети БПЛА, наземный и летающий сегмент, SDN, контроллер и коммутатор SDN, БПЛА-БС, БПЛА-UE, сенсорное поле, ретрансляция данных, головной узел.

Информация о статье

УДК 004.77.

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 27.11.2020, принята к печати 23.12.2020.

Ссылка для цитирования: Модель М. В., Коваленко В. Н., Волков А. Н., Мутханна А. С. А. Методы реализации контроллеров SDN в сети БПЛА // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 4. С. 23–34. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-4-23-34.

IMPLEMENTATION METHODS FOR SDN CONTROLLERS IN A UAV NETWORK

M. Model, V. Kovalenko, A. Volkov, A. Muthanna

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: kovalenkovadim1996@gmail.com

Abstract—Research subject. The division of the performed functions between all UAVs of the same cluster, a comparison of the methods for implementing the SDN controller into the UAV network, a description of the sequence of actions implemented in the UAV cluster, depending on a specific application scenario. **Method.** Analysis of standards and recommendations in the field of SDN technologies and construction of UAV networks; Comparison of SDN controller implementation methods: outside the cluster, on the head node, on all UAVs of the same cluster, and implementation using two controllers (one outside the cluster, and the second on the head node). **Core results.** 4 ways of using the UAV are described in detail, as well as the sequence of actions performed by the UAV cluster for each method; Compared 4 ways to implement the SDN controller in the UAV network; A method for dividing the performed functions between UAVs of one cluster is presented. **Practical relevance.** The sequences of actions presented for each method of application will allow in the future to implement the execution of these scenarios using a UAV cluster; The article details the advantages and disadvantages of all four ways to implement an SDN controller; the presented method of dividing functions between UAVs has less resource consumption for individual UAVs and for the entire cluster as a whole, than with the method with the implementation of all functions on each UAV of the cluster.

Keywords—UAV, UAV networks, ground and flying segment, SDN, SDN controller and switch, UAV-BS, UAV-UE, sensor field, data relay, head node.

Article info

Article in Russian.

Received 27.11.2020, accepted 23.12.2020.

For Citation: Model M., Kovalenko V., Volkov A., Muthanna A.: Implementation Methods for SDN Controllers in a UAV Network // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss 4. pp. 23–34 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-4-23-34.

Введение

С развитием сетей связи увеличивается и общее количество сетевых устройств. Например, по оценкам некоторых экспертов, число «Интернет вещей» может достигнуть 50 триллионов. Но увеличение количества устройств не единственная проблема сетей связи 2030 годов – объемы передаваемого по сети трафика также будут расти. Если сравнивать предполагаемый уровень трафика в 2030 году будет в 20 000 раз больше, чем уровень трафика 2010 года. Для обработки запросов мобильных пользователей, а также для сбора данных от сенсорных устройств потребуется применение новых технологий.

Одним из перспективных направлений развитие как сетей 5G/IMT-2020 считается развитие сетей «беспилотных летающих аппаратов БПЛА».

Способы применения БПЛА

В данной статье рассматриваются следующие способы применения БПЛА:

1. Когда на БПЛА установлены приемопередатчики или БПЛА реализует функции базовых станций БС [1].

В данном способе БПЛА могут применяться:

I. Для уменьшения нагрузки на стационарную базовую станцию в зоне с большим количеством мобильных пользователей, что в свою очередь будет способствовать увеличению емкости сети и улучшению характеристик QoS предоставляемых пользователю сервисов [1].

II. Для восстановления связи после частичного или полного разрушения наземной инфраструктуры в результате различных стихийных бедствий [2].

БПЛА данного способа применения предлагается называть БПЛА-БС [1].

БПЛА-БС также могут использовать наиболее новые виды технологий радиодоступа, среди которых: mmWave, VLC (связь по видимому свету, *Visible Light Communication*), FSO (Оптическая связь в свободном пространстве, *Free-Space Optical Communication*) и LiDAR (обнаружение и определение дальности с помощью света, *light detection and ranging*).

2. Применение БПЛА для сбора данных с сенсорных полей [1, 2].

БПЛА может использоваться для установки на местности сенсорных устройств (тем самым осуществляя формирование сенсорных полей), и последующего сбора различных показаний окружающей среды.

Стоит отметить, что сбор данных при помощи БПЛА осуществляется намного быстрее, чем при использовании для сбора данных устройств наземной инфраструктуры. В основном это связано с высокой мобильностью БПЛА, меньшими задержками и более высокой пропускной способностью канала воздух-земля.

Одна из основных проблем БПЛА при данном способе применения – определение оптимальной траектории перемещения БПЛА в условиях ограниченного запаса энергии.

3. БПЛА, осуществляющие функции ретрансляции данных (БПЛА-ретрансляторы) [2].

В данном способе применения БПЛА могут использоваться:

– для передачи данных не требовательных (толерантных) к задержкам между двумя удаленными мобильными устройствами пользователей. В данном случае БПЛА-ретрансляторы позволяют организовать передачу данных через местность, на которой из-за ее географического ландшафта невозможно развернуть стандартную наземную сетевую инфраструктуру (например, если необходимо передать данные через горную гряду);

– для осуществления ретрансляции данных в сетях с прерывистым соединением. В данном случае БПЛА способствуют улучшению качества передачи данных.

4. БПЛА, выполняющие функции пользовательского оборудования (БПЛА-UE, БПЛА – *User Equipment*) [1].

В данном способе БПЛА-UE могут осуществлять взаимодействие с наземным или летающим сегментом сети для обмена различными данными (такими как, мобильность, передача данных, высота, режим полета и т. д.). Также в рамках данной работе к данному способу предлагается отнести задачу по выполнению запроса пользователя.

Организация сети с БПЛА

Сети с БПЛА состоят из двух частей: наземного сегмента, включающего в себя базовые станции, сенсорные датчики и различные устройства пользователей, такие как смартфоны, ноутбуки и планшетные компьютеры, а также летающего, реализованного одиночными БПЛА или группами БПЛА [2].

На данный момент существует много способов организации сети БПЛА. При этом как наземный, так и летающий сегмент может обладать как одно ранговой, так и многоуровневой организацией. Первоначально для выполнения определенных задач использовались только одиночные БПЛА, однако с развитием сетей нового поколения все чаще будут использоваться группы БПЛА.

Для того, чтобы группы БПЛА могли осуществлять выполнение поставленных перед ними задач, необходимо определить способ взаимодействия БПЛА с летающим сегментом. Рассмотрим подробнее архитектуру сети БПЛА с кластерной организацией летающего сегмента [1].

В данной архитектуре все БПЛА распределены между несколькими кластерами. Для каждого кластера БПЛА выбирается головной узел, который будет осуществлять взаимодействие БПЛА своего кластера с БПЛА других кластеров или с базовой станцией (также с использованием головного узла возможно взаимодействие с устройствами сети не относящимся к кластерам БПЛА) [1].

Программно-конфигурируемые сети SDN

Развитие программно-конфигурируемых сетей SDN (*Software Defined Networks*) началось в 2006 году с введения данной концепции сотрудниками Калифорнийского и Стэнфордского университетов¹.

По мнению международного союза электросвязи, SDN – это технологию построения сетей, позволяющая организовать централизованный, программируемый уровень управления и позволяющая изолировать уровень управления от уровня данных^{2,3}.

При развитии программно-конфигурируемых сетей стояла задача по абстрагировании (отделении) плоскости управления (*control plane*) от плоскости передачи данных (*data plane*), осуществляемое благодаря переносу логики управления сетью на специально устройство – контроллер SDN^{4,5}.

Функциональная архитектура SDN сетей состоит из трех уровней^{6,7}:

1. Уровня приложений (*Application Layer*), отвечающий за предоставление услуг и сервисов.
2. Уровень управления (*Control Layer*), на котором располагается контроллер SDN. На данном уровне реализована логика управления всей сетью.
3. Уровень данных (*Infrastructure layer*), на котором организована передача информации между сетевыми устройствами.

¹ Программно-конфигурируемые сети | Открытые системы. [Электронный ресурс] – <https://www.osp.ru/os/2012/09/13032491>

² Там же.

³ Recommendation Y.3300 Framework of software-defined networking, Geneva. – June 2014.

⁴ См. ссылка 1.

⁵ См. ссылка 3.

⁶ См. ссылка 1.

⁷ См. ссылка 3.

Взаимодействие уровня управления с уровнем приложения осуществляется по «Северному интерфейсу» (*Northbound API*), уровня управления с уровнем данных – по «Южному интерфейсу» (*Southbound API*). В качестве «Южного интерфейса» чаще всего используется протокол OpenFlow и OFConfig^{8,9}.

Применение технологии SDN в сетях БПЛА

Технология SDN, благодаря гибкому централизованному управлению, позволит оптимизировать балансировку нагрузки в сети БПЛА, уменьшит нагрузку и потери пакетов, а также увеличит эффективность использования сетевых ресурсов (в том числе и радио ресурсов) и характеристики качества предоставляемых услуг (QoS)^{10,11} [1].

При применении в сети БПЛА технологии SDN БПЛА должны выполнять функции коммутаторов SDN. Управление потоками данных, а, следовательно, и самой передачей данных осуществляется с помощью контроллера SDN, который может быть реализован как в наземном сегменте на базовых станциях, так и в летающем, когда функции контроллера SDN выполняют или БПЛА, или неподвижные воздушные шары [1].

Относительно архитектуры с кластерной организацией летающего сегмента БПЛА возможны следующие способы реализации контроллера SDN:

Функции контроллера SDN выполняют базовые станции наземного сегмента или воздушные шары. В данном способе управлением потоками данных как внутри кластеров, так и между ними будут настраиваться одним контроллером, размещаемым на базовой станции или на воздушном шаре. Из всех описанных в статье способов реализации на контроллер SDN, представленный в данном способе, будет обладать большей нагрузкой от служебного трафика, т. к. на один контроллер будет осуществляться выполнение большим количеством устройств.

Функции контроллера SDN реализованы только на головном узле кластера БПЛА. В данном способе управление потоками с использованием технологии БПЛА осуществляется только внутри кластера БПЛА (взаимодействие кластеров БПЛА осуществляется без использования технологии SDN. По сравнению с первым способом нагрузка от служебного трафика на контроллер SDN в данном способе реализации будет меньше (так как контроллер SDN обладает меньшим количеством подконтрольных устройств). Стоит также отметить из-за разряда внутренней батареи БПЛА в каждом кластере через определенные промежутки времени будет производиться выбор нового головного узла. Таким образом, все выполняемые функции (по управлению потоками внутри кластера и взаимодействию с устройствами вне кластера) от старого головного узла должны быть переданы новому. Поэтому, после выбора нового головного узла будет осуществляться процесс миграции функций контроллера SDN, который также будет расходовать часть ресурсов кластера по передаче потоков данных (другими словами, на осуществление процесса миграции функций контроллера SDN будет расходоваться часть от пропускной способности каналов связи между БПЛА).

⁸ Программно-конфигурируемые сети | Открытые системы. [Электронный ресурс] – <https://www.osp.ru/os/2012/09/13032491>

⁹ Recommendation Y.3300 Framework of software-defined networking, Geneva. – June 2014.

¹⁰ См. ссылка 8.

¹¹ См. ссылка 9.

Функции контроллера SDN реализованы на всех БПЛА в пределах одного кластера. При этом контроллер на головном узле кластера будет работать в режиме ведущий (*master*), а всех остальных БПЛА – в режиме ведомый (*slave*). Также, как и во втором способе управление потоками осуществляется только в пределах одного кластера. Стоит отметить, что в данном способе вместо миграции контроллера SDN к новому головному узлу при разряде внутренней батареи текущего головного узла будет осуществляться изменение режима работы контроллера (контроллер нового головного узла перейдет в режим работы ведущий или *master*). При этом будет расходоваться меньшее количество ресурсов передачи данных (пропускной способности каналов связи) кластера БПЛА (передача служебной информации о изменении режима работы контроллера SDN расходует меньше пропускной способности каналов связи, чем передача всего контроллера SDN новому головному узлу). Однако, так как в данном способе на каждом БПЛА реализован свой собственный контроллер SDN, количество свободных ресурсов памяти всего кластера будет меньше, если сравнивать со свободными ресурсами памяти кластера БПЛА во втором способе реализации контроллера.

Когда функции контроллера SDN реализованы и на головном узле, и на базовой станции (или воздушном шаре). Данный способ является объединением первого и второго способа. Контроллер SDN на воздушном шаре или базовой станции управляет потоками передачи данных между кластерами, а контроллер на головном узле – потоками внутри кластера. Для предоставления информации о подконтрольных устройствах контроллеры SDN могут обмениваться информацией между собой (в частности контроллер на головном узле может передать данные о потоках своего кластера контроллеру базовой станции или воздушного шара). Данный способ реализации позволяет управлять потоками данных между кластерами БПЛА. При этом нагрузка от служебного трафика у данного способа, по сравнению с первым, будет меньше.

Организация кластера БПЛА

Так как предполагается, что кластер БПЛА будет применяться для всех четырех способов применения, описанных ранее, то полный список выполняемых в кластере функций будет следующий:

1. Функции Базовой станции.
2. Функции Контроллера Базовых станций.
3. Функции ретрансляции данных.
4. Функции обработки запросов пользователей (БПЛА-UE).
5. Функции коммутатора SDN.
6. Функции контроллера SDN.
7. Функции головного узла (в том числе и по взаимодействию с устройствами вне кластера БПЛА).

Функции Базовой станции и Контроллера базовых станций необходимы при использовании для снижения нагрузки на наземную базовую станцию, для восстановления связи после частичного или полного разрушения сетевой инфраструктуры или для сбора данных с сетевых полей.

Функции контроллера и коммутатора SDN осуществляют управление потоками данных внутри кластера БПЛА.

Использование всех функций на одном БПЛА снижает количество свободных ресурсов не только определенного БПЛА, но и всего кластера в целом. Поэтому более эффективно было бы разделить выполняемые функции между всеми кластерами БПЛА.

Если рассматривать кластер БПЛА со стороны управления потоков данных, то его организация будет следующей:

- 1 логический уровень будет реализован БПЛА-БС, принимающие запросы мобильных пользователей, а также собирающие данные с сенсорных полей.
- На 2 логическом уровне БПЛА реализуют функции контроллера базовых станций и коммутатора SDN.
- На 3 логическом уровне будет располагаться головной узел, который также будет осуществлять функции контроллера SDN.
- В качестве БПЛА-UE для обработки запросов пользователей могут использоваться любые БПЛА всех описанных логических уровней.
- Разные БПЛА-UE одного кластера могут обрабатывать разный набор задач пользователя.
- Для осуществления ретрансляции данных между двумя удаленными пользователями необходимо у БПЛА выделить часть памяти для хранения пользовательских данных.
- Головной узел кластера будет ответственен за выбор БПЛА для обработки запроса пользователя, за выбор БПЛА для хранения собранных данных, а также за передачу данных устройствам вне кластера.

Также предлагается для управления потоками передачи информации функции контроллера SDN дополнительно реализовывать на наземной базовой станции или на воздушном шаре.

Последовательность выполняемых кластером БПЛА действий

Последовательность выполняемых кластером БПЛА действий зависит от способа применения БПЛА.

Для всех способов применения будут одинаковы следующие первоначальные действия:

1. Получения БПЛА-БС данных от мобильных пользовательских устройств или сенсорных датчиков.
2. Определение класса задачи (пользовательская, сбора данных от сенсорных полей, обеспечение связи с другим пользователем, ретрансляция или передача данных между двумя удаленными пользователями). Определённому классу задач соответствует конкретный способ применения БПЛА.

Для обработки пользовательской задачи последовательность действий будет следующая (рис. 1):

1. Передача запроса пользователя головному узлу.
2. Выбор головным узлом БПЛА-UE для обработки запроса пользователя. Головной узел должен обладать таблицей, содержащей информацию о том, каким количеством ресурсов обладает каждый БПЛА и какие сервисы реализованы на них.
3. Если в кластере БПЛА отсутствует БПЛА-UE, способный обработать запрос, то устройству пользователя посылается уведомление о невозможности выполнения поставленной задачи.

4. После успешного определения БПЛА-UE для обработки осуществляется передача выбранному БПЛА информации о запросе пользователя и об устройстве, отправившем запрос (для передачи результатов обработки конечному пользователю напрямую без участия головного узла, что в свою очередь позволит сократить время, затрачиваемое на отправку пользователю результатов выполнения запроса).

5. Выполнения запроса пользователем выбранным БПЛА-UE.

6. Если выбранный БПЛА-UE не может выполнить запрос, то он отправляет головному узлу информацию о невозможности выполнения поставленной задачи. После этого головной узел БПЛА должен осуществить выбор нового БПЛА-UE (все шаги, начиная со 2, повторяются).

7. При успешном выполнении задачи пользователем осуществляется передача результатов обработки устройству, от которого поступил запрос.

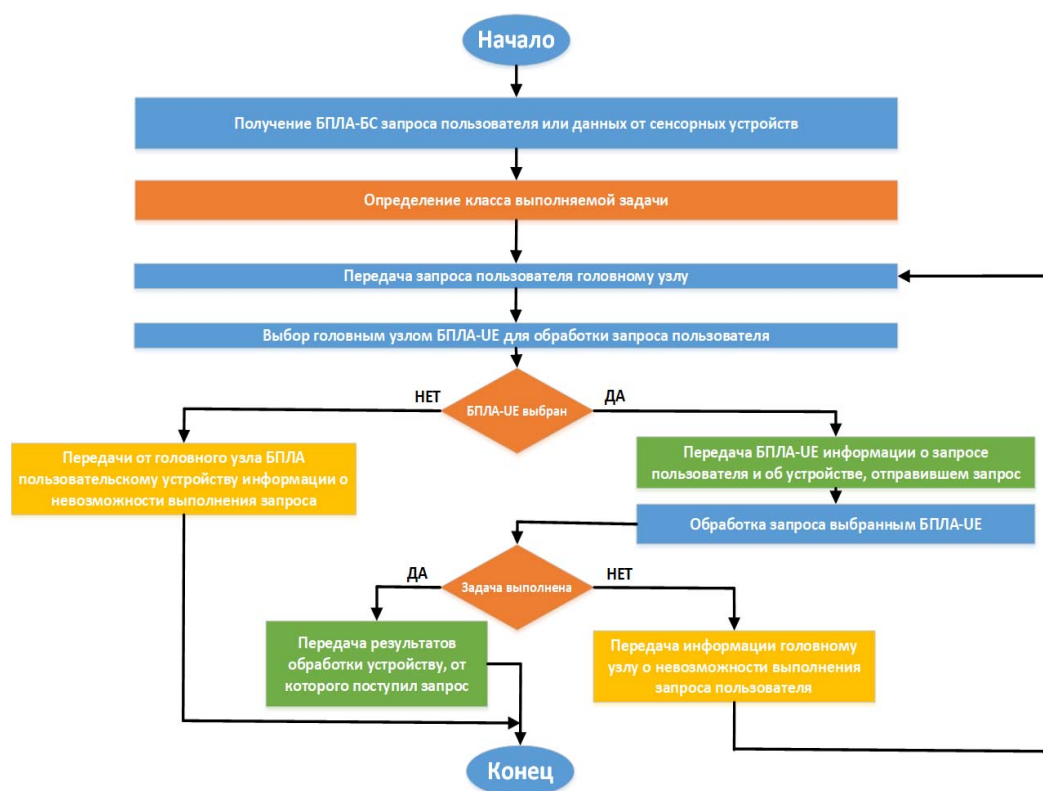


Рис. 1. Последовательность выполняемых действий при обработке запросов пользователей

Примечание: Головной узел в своей таблице задач для правильного выбора устройства для обработки запроса должен содержать информацию об услугах, которые может предоставлять система вне кластера БПЛА (некоторые услуги могут быть выполнены устройствами наземного сегмента или вышестоящих уровней летающего сегмента).

Для задачи ретрансляции данных (рис. 2):

1. Передача головному узлу информации о конечном пользователе, который должен получить собранные данные.

2. Определение можно ли при данном маршруте кластера передать данные конечному пользователю. В данном случае рассматривается пример, когда передать данные через существующую наземную структуру конечному пользователю

нет возможности. К данному случаю также можно отнести и сбор данных сенсорных полей с последующей передачей данных удаленному пользователю (возможность передать данные через наземную инфраструктуру также отсутствует).

3. Если передать данные конечному пользователю нет возможности, то собравшему данные БПЛА посылается отрицательный ответ, после чего собранные данные удаляются.

4. Если кластер БПЛА может передать данные конечному пользователю, то происходит определение БПЛА для хранения этих данных.

5. Информация о БПЛА для хранения данных передается БПЛА-БС собравшему данные, после чего данные передаются от БПЛА-БС к БПЛА для хранения.

6. Когда конечный пользователь будет находится в зоне кластера, головной узел отправит информации о передаче (по какому маршруту в кластере БПЛА можно передать данные конечному пользователю).

7. Осуществление передачи от БПЛА для хранения к конечному пользователю собранных данных.

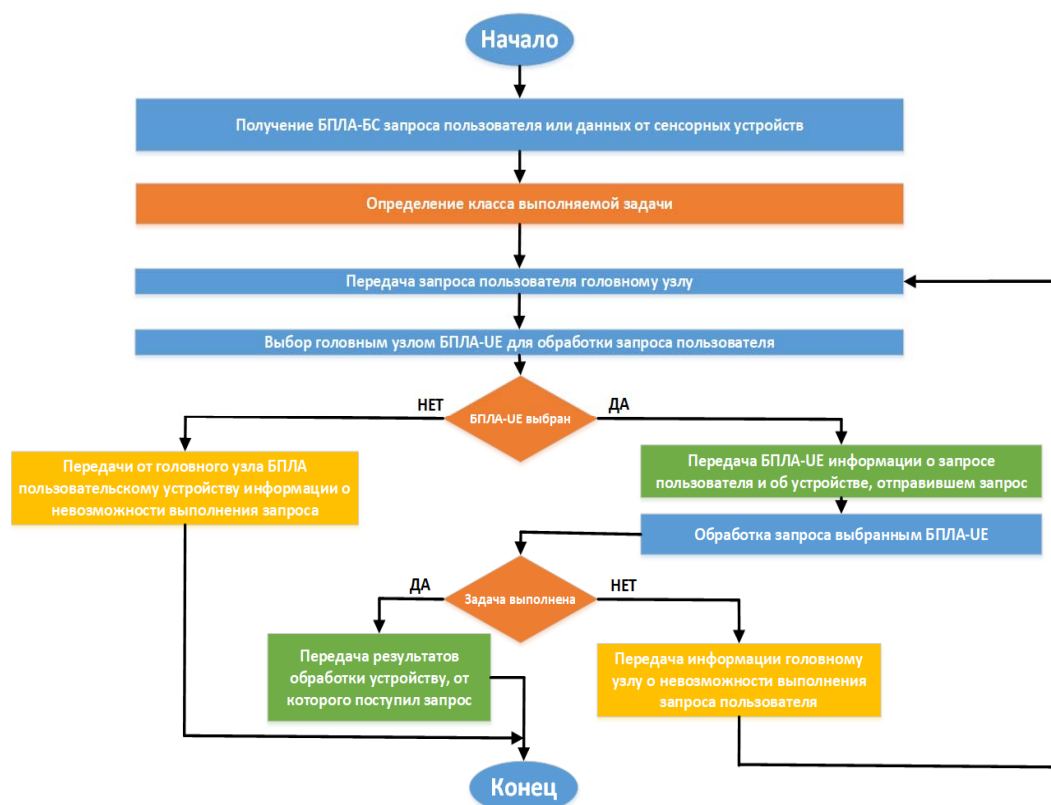


Рис. 2. Последовательность действий при ретрансляции информации посредством БПЛА

Для задачи сбора и передачи данных с сенсорных полей (рис. 3):

1. После окончательного сбора данных сенсорного поля или через определенный промежуток времени БПЛА-БС отправит на головной узел информацию о собранных данных.

2. Головной узел осуществит далее определения маршрута передачи данных к конечному пользователю.

3. Информация о маршруте передачи будет отправлена обратно к БПЛА-БС.

4. Далее будет осуществляться передача данных от БПЛА-БС к конечному пользователю.

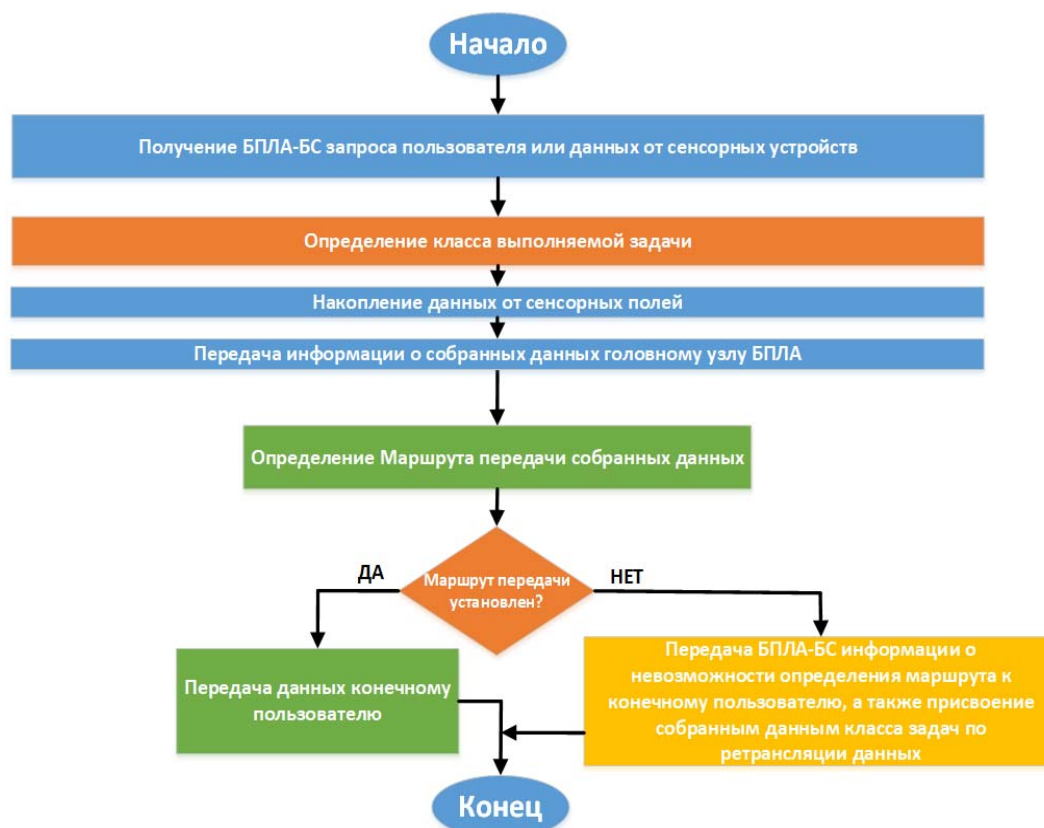


Рис. 3. Последовательность действий при сборе данных с сенсорных полей

Если в ходе определения маршрута передачи собранных данных было установлено, что по существующей наземной инфраструктуре (или с помощью БПЛА данного кластера) невозможно передать данные сенсорных полей, то собранным данным предлагается присвоить класс задач по ретрансляции данных.

Для задачи обеспечения связи с другим пользователем (рис. 4):

1. На БПЛА-БС определяется, находится ли конечный пользователь в зоне данного БПЛА.

2. Если да, то осуществляется процесс организация канала связи с конечным пользователем.

3. Если нет, то информация о требуемой связи с конечным пользователем передается головному узлу.

4. Головной узел, в свою очередь определяет может ли один из БПЛА кластера осуществить соединение с конечным пользователем.

5. Если да, то осуществляется процесс организация канала связи с конечным пользователем.

6. Если нет, то данные о требуемом соединении передаются через БПЛА наземной инфраструктуре мобильной связи для нахождения конечного пользователя, с которым необходимо связаться.

При выполнении данных задач периодически из-за разряда внутренней батареи будут повторяться процессы выбора нового головного узла и последующей миграции на него функций текущего головного узла.

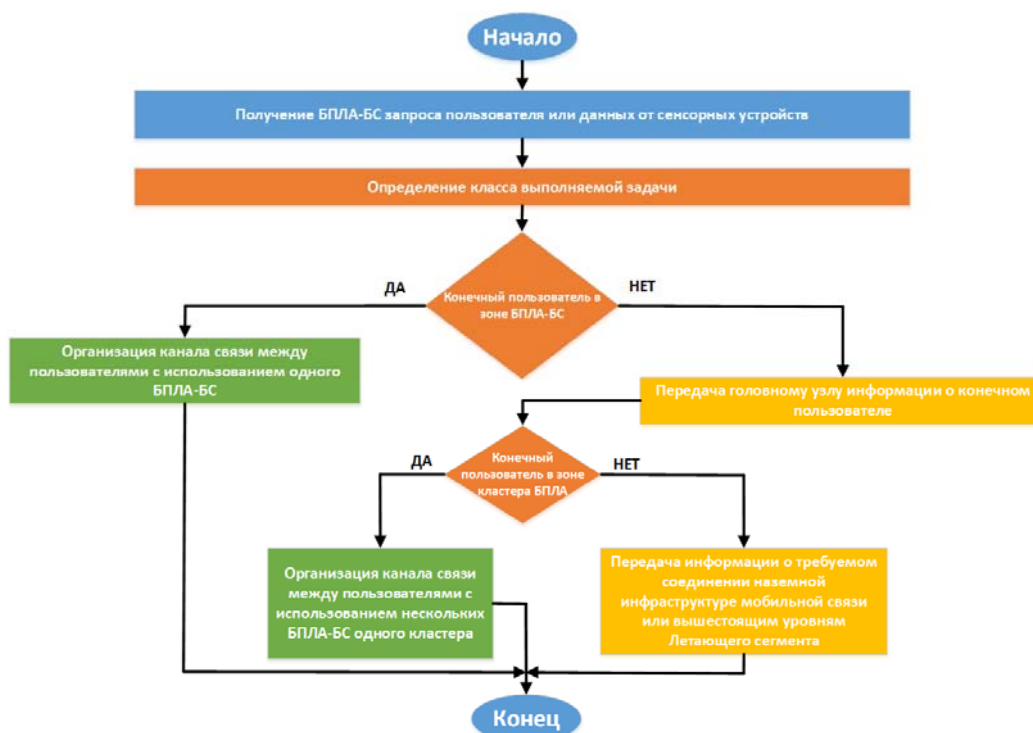


Рис. 4. Последовательность действий при организации канала связи посредством БПЛА

При отсутствии на БПЛА-ВС свободной памяти для хранения информации поступающие запросы и данные от сенсорных полей будут отбрасываться.

Выводы

В данной статье были рассмотрены четыре возможных способа применения БПЛА.

В статье также были представлены и сравнены 4 возможных способа реализации контроллера SDN в сетях БПЛА.

Особое внимание было уделено выполняемым в кластере БПЛА функциям (в зависимости от способа применения и интеграции в сеть БПЛА технологии SDN), а также проблеме одновременной реализации всех данных функций на каждом БПЛА кластера.

Для решения данной проблемы был предложен способ разделения функций между БПЛА одного кластера. Предложенный в статье способ организации кластера БПЛА обладает практической ценностью, так как позволяет освободить часть вычислительных и запоминающих ресурсов отдельных БПЛА и кластера в целом.

Для каждого из способов применения была описана последовательность выполняемых действий, что в будущем может быть использовано при организации кластеров БПЛА для одного из представленных сценариев применения.

Литература

1. O. S. Oubbati et al.: Omar Sami Oubbati, Mohammed Atiquzzaman, Tariq Ahamed Ahanger, Atef Ibrahim, Softwarization of UAV Networks: A Survey of Applications and Future Trends // IEEE Access, Vol. 4, 2020, pp. 98073–98125.
2. Шкляева А. В., Киричек Р. В., Кучерявый А. Е. Методы тестирования летающих сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 2. С. 43–52.

3. V. Nikolayevich, A. Alzaghira, A. Volkov, A. Muthanna, A. Koucheryavy, Clustering algorithms for UAV placement in 5G and Beyond Networks // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2020, pp. 301–307.
4. A. Borodin, A. Koucheryavy, From IMT-2020 to Network-2030 // 4th ITU workshop on Network 2030 jointly with ITU Forum on Future Applications and Services. Perspective 2030, 2019.
5. Lin, Xingqin, et al. "Mobile network-connected drones: Field trials, simulations, and design insights." IEEE Vehicular Technology Magazine 14.3 (2019): 115–125.
6. C. J. Katila, B. Okolo, C. Buratti, R. Verdona, and G. Caire. UAV-to-Ground Multi-Hop Communication Using Backpressure and FlashLinQBased Algorithms // In Proceedings of the IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2018, pp. 1179–1184.
7. Shakhathreh, Hazim, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges // IEEE Access 7 (2019): 48572–48634.

References

1. O. S. Oubbati et al.: Omar Sami Oubbati, Mohammed Atiquzzaman, Tariq Ahamed Ahanger, Atef Ibrahim, Softwarization of UAV Networks: A Survey of Applications and Future Trends // IEEE Access, Vol. 4, 2020, pp. 98073–98125.
2. Shklyayeva A., Kirichek R., Koucheryavy A. Methods for the Flying Ubiquitous Sensor Networks // TelecomIT. 2016. Vol. 4. Iss. 2. pp. 43–52 (in Russian).
3. V. Nikolayevich, A. Alzaghira, A. Volkov, A. Muthanna, A. Koucheryavy, Clustering algorithms for UAV placement in 5G and Beyond Networks // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). 2020, pp. 301–307.
4. A. Borodin, A. Koucheryavy, From IMT-2020 to Network-2030 // 4th ITU workshop on Network 2030 jointly with ITU Forum on Future Applications and Services. Perspective 2030, 2019.
5. Lin, Xingqin, et al. "Mobile network-connected drones: Field trials, simulations, and design insights." IEEE Vehicular Technology Magazine 14.3 (2019): 115–125.
6. C. J. Katila, B. Okolo, C. Buratti, R. Verdona, and G. Caire. UAV-to-Ground Multi-Hop Communication Using Backpressure and FlashLinQBased Algorithms // In Proceedings of the IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). IEEE, 2018, pp. 1179–1184.
7. Shakhathreh, Hazim, et al. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges // IEEE Access 7 (2019): 48572–48634.

Модель Михаил Викторович – магистрант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, modelmv97@gmail.com

Model Mikhail – Undergraduate student, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, modelmv97@gmail.com

Коваленко Вадим Николаевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, kovalenkovadim1996@gmail.com

Kovalenko Vadim – Postgraduate Student, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, kovalenkovadim1996@gmail.com

Волков Артем Николаевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, artemanv.work@gmail.com

Volkov Artem – Postgraduate student, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, artemanv.work@gmail.com

Мутханна Аммар Салех Али – кандидат технических наук, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, ammarexpress@gmail.com

Muthanna Ammar – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, ammarexpress@gmail.com