



ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ МЕТОД МИГРАЦИИ СЕРВИСОВ В СЕТЯХ БПЛА

В. Н. Коваленко^{1*}, А. О. Родакова¹, А. С. А. Мутханна¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: kovalenkovadim1996@gmail.com

Аннотация—Предмет исследования. Написание алгоритма (последовательности действий), выполняемого при снижении заряда внутренней батареи БПЛА для осуществления миграции сервисов с одного БПЛА на другой и перемещения БПЛА в зоны подзарядки внутренней батареи. **Метод исследования.** Изучение способов организации архитектуры сетей с БПЛА, сфер применения БПЛА; рассмотрение различных способов реализации SDN контроллера: на наземной базовой станции, на неподвижном воздушном шаре, на головном узле, на всех БПЛА одного кластера и реализация с использованием нескольких контроллеров разных уровней; определение основных преимуществ от применения в системах БПЛА концепции SDN. **Основные результаты.** Подробно описаны 4 способа применения БПЛА, а также основные функции, которые должны быть реализованы в кластере БПЛА для выполнения задач всех 4 сфер применения, а также реализации в летающем сегменте концепции SDN; рассмотрены возможные способы реализации контроллера SDN в сетях с БПЛА; Представлены основные преимущества, получаемые в системах БПЛА при реализации концепции SDN; теоретически обоснована необходимость миграции сервисов от одного БПЛА на другой и нецелесообразности реализации всех функций на каждом БПЛА: заряд внутренней батареи БПЛА ограничен, а чем больше сервисов или функций реализовано на БПЛА, тем больше энергопотребление; предложен алгоритм (последовательность действий), который будет выполняться при разряде внутренней батареи БПЛА. Этот алгоритм включает в себя следующие процессы: процесс определения БПЛА для последующей миграции сервиса, процесс определения маршрута миграции сервиса, а также процессы по отправке БПЛА на подзарядку встроенной батареи и по возвращении БПЛА в состояние выполнения поставленных перед ним задач. **Практическая значимость.** Статья содержит подробное описание способов организации архитектуры БПЛА, основных сфер применения БПЛА, а также преимуществ, получаемых в системах БПЛА при реализации концепции SDN. Также практической пользой обладает информация об возможных способах реализации контроллера SDN. Представленный алгоритм (последовательность действий) по осуществлению миграции сервисов и перемещения БПЛА в зоны подзарядки в будущем может быть применен на практике при снижении заряда встроенной батареи БПЛА до определенного уровня.

Ключевые слова—БПЛА, наземный и летающий сегмент, SDN, контроллер и коммутатор SDN, головной узел, миграция сервисов, наземные базовые станции, неподвижные воздушные шары.

Информация о статье

УДК 004.732.

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 26.06.2021, принята к печати 10.12.2021.

Ссылка для цитирования: Коваленко В. Н., Родакова А. О., Мутханна А. С. А. Энергоэффективный метод миграции сервисов в сетях БПЛА // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Том 9. № 3. С. 34–47. DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-3-34-47.



AN ENERGY-EFFICIENT ALGORITHM FOR SERVICE MIGRATION IN UAV NETWORKS

V. Kovalenko^{1*}, A. Rodakov¹, A. S. Muthanna¹

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: kovalenkovadim1996@gmail.com

Abstract—Research subject is developing an algorithm (sequence of actions) performed when the charge of the internal battery of the UAV is reduced to migrate services from one UAV to another and move the UAV to the charging zones of the internal battery. **Research method.** Studying the ways of organizing the architecture of networks with UAVs, UAV applications; consideration of various ways to implement an SDN controller: at a ground Base Station, on a fixed balloon, at the head node, on all UAVs of one cluster and implementation using several controllers of different levels; identification of the main advantages from the use of the SDN concept in UAV systems. **Core results.** 4 ways of using UAVs are described in detail, as well as the main functions that should be implemented in the UAV cluster to perform tasks in all 4 areas of application, as well as to implement the SDN concept in the flying segment; possible ways of implementing the SDN controller in networks with UAVs are considered; the main advantages obtained in UAV systems when implementing the SDN concept are presented; theoretically substantiated the need to migrate services from one UAV to another and the inexpediency of implementing all functions on each UAV: the charge of the internal UAV battery is limited, and the more services or functions are implemented on the UAV, the more power consumption; an algorithm (sequence of actions) is proposed that will be performed when the internal battery of the UAV is discharged. This algorithm includes the following processes: the process of determining the UAV for subsequent service migration, the process of determining the service migration route, as well as the processes for sending the UAV to recharge the built-in battery, and upon returning the UAV to the state of performing the tasks assigned to it. **Practical relevance.** The article contains a detailed description of the ways of organizing the UAV architecture, the main areas of UAV application, as well as the advantages obtained in UAV systems when implementing the SDN concept. Also useful is information on possible ways to implement the SDN controller. The presented algorithm (sequence of actions) for the implementation of the migration of services and the movement of the UAV to the recharge zones in the future can be applied in practice when the charge of the built-in UAV battery is reduced to a certain level.

Keywords—UAV, UAV networks, ground and flying segment, SDN, SDN controller and switch, head node, service migration, ground Base Stations, stationary balloons..

Article info

Article in Russian.

Received 26.06.2021, accepted 10.12.2021.

For citation: Kovalenko V., Rodakov A., Muthanna A. S.: An Energy-Efficient Algorithm for Service Migration in UAV Networks // Telecom IT. 2021. Vol. 9. Iss. 3. pp. 34–47 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2021-9-3-34-47.



Введение

В 1991 году в своей презентации для Procter&Gamble, посвященной влиянию меток радиочастотной идентификации на различные сферы рынка, возможно впервые был употреблен термин Интернет Вещей [1]. С того момента количество устройств, подключенных к сети интернет постоянно увеличивалось. В 2009 году компания Ericsson и в 2010 году компания Cisco проводили собственные анализы по развитию рынка Интернета Вещей. В результате проведенных данными компаниями исследований было установлено, что количество устройств Интернета Вещей к 2020 году достигнет 50 млрд [2, 3]. Конечны их прогнозы не оправдались так как, например, к 2018 году в соответствии с анализом рынка Интернета Вещей, выполненным компанией Strategy Analytics, количество устройств, обладающих подключением к сети интернет, достигло только 22 млрд [4]. Однако развитие концепции Интернета Вещей до настоящего момента времени обладает высокими перспективами. Так, например, по новым прогнозам, выполненным той же компанией Strategy Analytics, количество устройств Интернета Вещей достигнет 50 млрд к 2030 году. Также развитие концепции Интернета Вещей способствовало появлению сетей сверхвысокой плотности и сетей пятого поколения связи 5G/IMT-2020. При увеличении количества устройств, подключаемых к сети, растет и общее количество поступающего на них трафика. В определенный момент развития имеющейся базовой инфокоммуникационной инфраструктуры будет недостаточно для полноценной обработки всех поступающих от пользовательских устройств данных. К тому же при развитии концепции Интернета Вещей, а также сетей 5G/IMT-2020, появляются новые сферы применения, обладающие высокими требованиями к задержкам передачи данных. Так, например, при организации взаимодействия в сети беспилотного автотранспорта, может потребоваться обеспечить круговую задержку передачи пакетов данных на уровне 1 мс.

Таким образом, можно сделать вывод, что для удовлетворения растущих потребностей в предоставлении сверхнизких задержек передачи данных порядка 1 мс и для снижения нагрузки на базовую сеть, вызванную поступающим от пользовательских устройств трафиком, необходимо организовать системы, в основе функционирования которых будут лежать новые технологии, позволяющие снизить задержки передачи и оптимизировать нагрузку в сети.

Такая система может быть организована, например, с использованием Беспилотных Летательных Аппаратов (БПЛА), а также концепций программно-конфигурируемых сетей (*Software Defined Networks, SDN*).

Однако системы, использующие БПЛА обладают одним недостатком: заряд встроенной батареи БПЛА ограничен. Поэтому со временем в таких системах требуется осуществлять миграцию сервисов от БПЛА с разряженной встроенной батареей к другим БПЛА в сети.

Программно-конфигурируемые сети SDN

По мнению Открытого Фонда Сетевых Технологий, ответственного за развитие данной концепции, SDN – сетевая динамически управляемая и способная к адаптации инфраструктура, в которой уровень управления отделен от уровня



передачи данных, что в свою очередь предоставляет возможность программного управления сетью, а также абстрагирования уровня приложений и услуг (сетевых сервисов) от уровня сетевой инфраструктуры¹ [5, 6].

Началом развития SDN можно считать 2006 год [5, 6]. Именно в этом году сотрудниками и специалистами из Стэнфордского и Калифорнийского университета в Беркли была предложена данная концепция. Отправной точкой для SDN-индустрии послужило образование американской компании Nicira

Networks, основателями которой были авторы концепции SDN – профессора Ник МакКеон, Мартин Касадо и Скотт Шенкер.

Основными принципами программно-конфигурируемых сетей можно считать² [5, 6]:

1. Отделение самого процесса передачи от процесса управления потоками данных.

2. Наличие программно-управляемого, унифицированного, интеллектуального интерфейса, независимого от оборудования поставщика и размещаемого логически между уровнями передачи данных и уровнем управления.

3. Осуществление управления всей сетью в целом, а не только ее отдельными функциональными элементами (при этом управление должно осуществляться с использованием специализированного контроллера SDN).

4. Виртуализация сети и ее физических ресурсов.

Основные характеристики программно-конфигурируемых сетей могут быть представлены в следующих пунктах³ [5, 6]:

1. Централизованное управление сетью.

2. Предоставление возможности программного конфигурирования.

3. Осуществление непосредственного программирования уровня управления благодаря отделению уровня управления от уровня передачи данных.

4. Гибкость в регулировании потоков передачи данных, обеспечиваемое благодаря изоляции уровня управления от уровня передачи данных.

5. Независимость сетевой структуры от поставщиков оборудования и использование открытых стандартов, что в свою очередь позволяет упростить архитектуру сети и ее эксплуатацию.

Основной целью создания программно-конфигурируемых сетей было отделение плоскости управления (*control plane*) от плоскости передачи информации (*data plane*), что предлагалось осуществлять благодаря переносу логики управления сетью на специализированное устройство – контроллер. Данный подход к реализации обеспечивает более удобное управление сетевой структурой, что позволяет более эффективно и быстро внедрять новые сетевые сервисы и услуги.

Функционально Архитектура сетей SDN состоит из трех уровней: уровня приложений, уровня управления и уровня передачи данных.

1. Application Layer (уровень приложений).

Уровень приложения ответственен за реализацию сетевых услуг и сервисов.

¹ Recommendation Y.3300 Framework of software-defined networking, Geneva. – June 2014.

² Там же.

³ Там же.



Взаимодействие между уровнями приложений и управления осуществляется благодаря Северному Интерфейсу (*Northbound*) взаимодействия, который может быть реализован благодаря организации связи между контроллером SDN и уровнем приложений на основе API (*Application Programming Interface*).

2. Control Layer (уровень управления), реализующий логику управления сетью.

При этом основные функции плоскости управления осуществляются контроллером (сетевой операционной системой) SDN. Для взаимодействия с плоскостью приложений используется Северный интерфейс, а для взаимодействия с плоскостью Передачи данных – Южный интерфейс (*Southbound*). В качестве Южного интерфейса наиболее часто используется протокол OpenFlow.

3. Infrastructure layer (уровень инфраструктуры).

На данном уровне располагаются коммутаторы, обладающие возможностью поддержки протокола взаимодействия с контроллером SDN (обычно *OpenFlow*). Такими устройствами могут быть, например, OpenFlow коммутаторы.

В рамках концепции SDN в качестве централизованного контроллера рассматривается одиночный сервер, который управляет потоками передачи данных между всеми коммутаторами уровня инфраструктуры. Однако в больших сетях использование одного контроллера для управления потоками всех коммутаторов может оказаться громоздким и нежелательным. Поэтому наиболее выгодно разделять большую корпоративную сеть на несколько доменов SDN со своими собственными контроллерами SDN.

Для взаимодействия SDN контроллеров между собой или SDN контроллеров с другими сетями используется восточный/западный (*east/westbound*) интерфейс.

Применение нескольких доменов SDN позволит обеспечить высокую масштабируемость и надежность сетевой архитектуры, применение различных политик конфиденциальности, а также поэтапного развертывания сетевых инфраструктур.

Контроллеры могут размещаться на определенной территории как достаточно плотно, так и широко рассредоточено. В первом случае контроллеры позволяют обеспечить высокую пропускную способность, что наиболее эффективно подходит для центров обработки данных. А во втором – для многопозиционных сетей.

Традиционно развертывание контроллеров осуществляется горизонтально, когда одна сеть разделяется на несколько неперекрывающихся подмножеств коммутаторов плоскости передачи данных. Также возможно и вертикальное развертывание контроллеров SDN, когда задачи управления распределяются между различными контроллерами в зависимости от таких критериев, как вид сети и требования к местоположению.

Архитектура летающей программно-конфигурируемой сети

В предыдущем разделе было дано определение программно-конфигурируемым сетям и были рассмотрены их основные уровни архитектуры и функциональные элементы. Теперь предлагается рассмотреть возможность применения концепции SDN в системах БПЛА.



Концепция SDN благодаря таким преимуществам, как использование открытых стандартов, возможности организации сетевой инфраструктуры независимо от используемого оборудования (летающий сегмент организован БПЛА разных поставщиков), отделение плоскости управления (*control plane*) от плоскости передачи информации (*data plane*), а также осуществление централизованного и гибкого управления сетью, позволяет решить ряд наиболее актуальных на данный момент времени проблем, возникающих при организации систем БПЛА [7]. К таким проблемам можно отнести:

1. Непостоянный характер связей между БПЛА.
2. Возможность разделения сети на несколько отдельных фрагментов. Причиной фрагментации сети может служить высокая мобильность БПЛА.
3. Наиболее оптимального использования ресурсов БПЛА (так как вычислительные ресурсы и возможности по хранению данных у БПЛА ограничены).
4. Ограничений по возможностям взаимодействия с другими БПЛА и наземным сегментом (например, с базовыми станциями, с сенсорными полями или с устройствами пользователя).
5. Обеспечения предоставления обзора сетевой инфраструктуры глобально (необходимо для более эффективного развертывания систем БПЛА).
6. Повышение загруженности сети и потребления электроэнергии при высокой потребности в определенном виде трафика.

Применение концепции SDN в системах БПЛА кроме предоставления возможности решения данных проблем позволяет [7]:

1. Реализовать централизованное управление сетевой инфраструктурой. Централизованное управление в свою очередь позволяет повысить качество предоставляемых услуг и более эффективно использовать вычислительные, сетевые и запоминающие ресурсы БПЛА.
2. Осуществлять балансировку нагрузки между БПЛА и базовыми станциями наиболее оптимальным способом.
3. Осуществлять динамическое регулирование перемещения БПЛА в пространстве.
4. Уменьшить как нагрузку на сеть и потери пакетов данных.
5. Предоставить возможность по переконфигурированию сети. Изменение конфигурации сети может осуществляться как с использованием одного контроллера SDN, так и с использованием нескольких контроллеров.
6. Осуществление гибкого распределения радиоресурсов.

При применении концепции SDN в системах БПЛА функции коммутаторов SDN должны быть реализованы на отдельных БПЛА. Функции контроллера SDN могут быть реализованы различными способами как в наземном сегменте, так и в воздушном:

1. Реализация функций контроллера SDN на наземных базовых станциях.
2. Реализация функций контроллера SDN на неподвижных воздушных шарах. В рамках концепции SDN воздушные шары выступают в качестве аналога базовых станций, но в летающем сегменте сети.
3. Реализация функций контроллера SDN на БПЛА.

Рассмотрим более подробно данные способы реализации контроллера SDN при кластерной организации летающего сегмента сетей с БПЛА:



1. В первом и втором способе реализации контроллера SDN могут применяться для управления потоками между кластерами БПЛА и другими устройствами сети (взаимодействие БПЛА одного кластера с БПЛА другого кластера, с устройствами наземного или с устройствами воздушного сегмента, не входящими в кластеры БПЛА, осуществляется через головной узел).

2. Контроллер SDN в кластере БПЛА может быть реализован либо только на головном узле, либо на всех БПЛА кластера. В обоих случаях управление потоками осуществляется только в пределах одного кластера БПЛА.

3. При реализации контроллера SDN только на головном узле кластера необходимо осуществлять передачу функций контроллера SDN от головного узла к БПЛА, который будет выбран в качестве нового головного узла кластера, при разряде внутренней батареи старого головного узла.

4. При реализации контроллера SDN на всех БПЛА кластера головной узел должен работать в режиме контроллера SDN master (ведущий), а все остальные в режиме slave (ведомый). При разряде внутренней батареи головного узла, контроллер SDN головного узла переходит в режим работы slave. При этом контроллер SDN БПЛА, выбранного в качестве нового головного узла, должен перейти в режим работы master. Данный способ реализации контроллера SDN потребляет меньше сетевых ресурсов кластера, чем способ с реализацией контроллера только на головном узле, однако он использует больше ресурсов отдельных БПЛА и повышает их энергопотребление (больше выполняемых функций – больше энергопотребление).

5. Стоит также отметить, что функции контроллера SDN могут быть одновременно реализованы на наземных базовых станциях, неподвижных воздушных шарах и БПЛА кластера. При этом контроллеры базовых станций и воздушных шаров будут ответственны за взаимодействие между кластерами БПЛА и отдельными БПЛА с другими устройствами сети, а контроллеры на БПЛА – за управление потоками внутри кластера.

Основные элементы архитектуры

Перед определением основных функций, выполняемых в системах БПЛА, необходимо определить способы организации сетевой архитектуры и возможные сферы применения таких систем.

Сети, в организации которых в качестве одних из основных функциональных элементов используются БПЛА, являются беспроводными сенсорными сетями и состоят из двух сегментов [8]:

1. Наземного, в состав которого входят наземные базовые станции, сенсорные датчики и различные устройства пользователей. Стоит также отметить что устройства наземного сегмента как могут обладать возможностью к самоорганизации узлов сети (при этом взаимодействия с данными устройствами осуществляется по протоколам BLE, 6LoWPAN, ZigBee), так и не обладать такой возможностью (взаимодействие осуществляется благодаря использованию следующих протоколов: RFID, Wi-Fi, LoRa).

2. Летающего, организованного либо одиночными БПЛА, либо их группами.



Применение БПЛА возможно в самых разнообразных сферах жизнедеятельности. Рассмотрим несколько задач, для выполнения которых могут использоваться БПЛА.

1. Для выполнения функций Базовых Станций. В данном случае на БПЛА устанавливается приемопередатчик, который будет ответственен за обмен информацией с мобильными устройствами пользователя в наземном сегменте для установления связи между ними. БПЛА применяются в рамках данной задачи для разгрузки наземных Базовых Станций (при достаточно высоком количестве запросов на установление соединений, поступающих от пользователей мобильной сети к наземным базовым станциям) или для организации связи при чрезвычайных ситуациях, когда наземная инфраструктура может быть частично или полностью разрушена.

2. Для установки сенсорных датчиков на местности и последующего сбора данных с сенсорных полей. Благодаря высокой мобильности, более низким затратам передачи и более высокой пропускной способности канала воздух-земля, БПЛА осуществляют сбор данных намного быстрее, чем наземные Базовые Станции.

3. Для задач ретрансляции данных. Для данных задач предусматривается возможность хранения данных и последующей ее передачи пользователю, в тех случаях, когда передача данных с помощью наземной инфраструктуры трудно осуществима или невозможна (например, при отсутствии из-за географического ландшафта местности наземной инфраструктуры для связи с пользователем).

4. Для выполнения определенных запросов пользователей. Данный тип задач также, как и первый направлен на снижение нагрузки на Базовые Станции.

Изначально для выполнения поставленных задач было достаточно только одного или небольшого количества БПЛА, однако развитие новых технологий и увеличение количества устройств с доступом к сети потребует организации систем с большим количеством БПЛА в летающем сегменте, распределенных на несколько различных групп. Существует несколько способов организации сетей БПЛА, среди которых можно выделить централизованную, кластерную и сотовую архитектуры [9, 10].

В централизованной архитектуре обмен данными между несколькими БПЛА осуществляется через Базовую станцию. Преимущества: устойчивость системы при выходе из рабочего состояния отдельного БПЛА и возможность параллельного выполнения отдельными БПЛА нескольких задач. Недостатки: пропорциональная зависимость пропускной способности сети плотности БПЛА, уязвимость наземной инфраструктуры.

В сотовой архитектуре наземный сегмент разделяется на несколько ячеек с собственными полосами частот (для предотвращения влияния помех от других ячеек), а БПЛА могут взаимодействовать как между собой как напрямую, так и с использованием базовой станции. Возникающие проблемы: возможность поломки Базовых Станций и высокая стоимость их развертывания.

В кластерной организации сетей БПЛА летающий сегмент разбивается на несколько отдельных кластеров. Один из БПЛА таких кластеров выбирается в качестве головного узла. Головной узел ответственен за обмен данными между БПЛА внутри кластера и взаимодействия с другими кластерами и Базовой Сетью.



Преимущества данной архитектуры заключается в возможности использования БПЛА с разными характеристиками связи и полета. Недостатки: невозможность БПЛА одного кластера взаимодействовать с БПЛА другого кластера при частичном или полном повреждении наземной инфраструктуры.

Основные выполняемые функции в кластере БПЛА

В предыдущих разделах были рассмотрены четыре способа применения БПЛА. На основе данных способов и возможности применения концепции SDN в системах БПЛА перечень основных функций для БПЛА будет следующим:

1. Функции коммутатора SDN.
2. Функции контроллера SDN. Конечно, можно реализовывать функции контроллера только на наземных базовых станциях или неподвижных шарах, но в данном случае и воздушные шары, и наземные базовые станции могут не справиться с поступающей на них нагрузкой.
3. Функции Базовой станции. К данным функциям можно отнести задачи, связанные со сбором данных с сенсорных полей, приеме запросов пользователя или при выполнении функций, связанных канала связи между пользователями сотовой сети.
4. Функции Контроллера Базовых станций. В данном случае БПЛА выполняют функции, аналогичные контроллеру базовых станций стандартных сотовых сетей.
5. Функции головного узла (связанные, например, с взаимодействием БПЛА с устройствами вне кластера)
6. Функции для осуществления ретрансляции данных. Данные функции связаны с хранением данных. Такие функции могут быть применены либо для улучшения качества обслуживания при прерывистом соединении, либо для передачи данных в сетях толерантным к задержкам (например, при передаче данных между двумя удаленными пользователями через местность, на которой отсутствует или плохо развита наземная сетевая инфраструктура).
7. Функции обработки запросов пользователей.

Наиболее простым способ реализации данных функций будет использование всех перечисленных функций на каждом БПЛА. В данном случае потребность в осуществлении миграции сервисов с одного БПЛА на другой при разряде внутренней батареи отсутствовала бы. Однако использование всех функций на одном БПЛА снижает количество свободных ресурсов как самого БПЛА, так и суммарных ресурсов кластера (при кластерной организации летающего сегмента сети). При этом увеличение количества выполняемых функций БПЛА увеличивает объемы потребляемой БПЛА энергии.

Поэтому целесообразнее распределить функции между несколькими БПЛА. Именно в данном случае осуществление миграции сервисов с одного БПЛА на другой становится наиболее актуальной задачей.

Предлагаемый алгоритм

Как уже говорилось ранее, заряд внутренней батареи БПЛА ограничен, а реализация всех возможных функций на каждом БПЛА нецелесообразна, так как



в этом случае увеличивается потребление электроэнергии. Кроме того, реализация каждого сервиса (функции) на БПЛА расходует определенную часть ресурсов БПЛА (вычислительных, сетевых или ресурсов хранения данных). Поэтому при разряде внутренней батареи БПЛА потребуется осуществлять миграцию сервисов с одних БПЛА (на которых заряд внутренней батареи опустился ниже определенного уровня) на другие (обладающими достаточными ресурсами для реализации на них передаваемых сервисов).

В данной статье предлагается алгоритм (последовательность действий), осуществляемый при разряде внутренней батареи БПЛА и включающий процессы определения БПЛА для последующей миграции сервиса, маршрута миграции сервиса, а также процессы по отправке БПЛА на подзарядку встроенной батареи и по возвращении БПЛА в состояние выполнения поставленных перед ним задач.

Стоит отметить, что процессы определения БПЛА для последующей миграции, маршрута миграции, а также ближайшей зоны для подзарядки встроенной батареи БПЛА будут осуществляться на определенном вычислительном устройстве, в качестве которого могут выступать либо наземные базовые станции, либо неподвижные воздушные шары, либо головные узлы кластеров БПЛА (если летающий сегмент сети разделен на несколько кластеров). При этом такие вычислительные устройства должны знать информацию о свободных ресурсах всех подконтрольных им БПЛА: находящихся в зоне их покрытия (для наземных базовых станций и неподвижных воздушных шаров) или принадлежащих определенному кластеру (для головного узла кластера БПЛА). Для этого вычислительные устройства будут отправлять периодически запросы на получение информации о свободных ресурсах для всех подконтрольных им БПЛА.

На рис. 1 (см. ниже) изображены процесс миграции сервисов БПЛА, осуществляемый под управлением головного узла кластера, неподвижного воздушного шара, или наземной Базовой Станции, а также процессы перемещения БПЛА в зоны подзарядки внутренней батареи и последующего возвращения (после полной зарядки) к выполнению поставленных ранее задач.

Предлагаемый алгоритм будет состоять из следующих этапов:

1. Отправка БПЛА при снижении заряда внутренней батареи до определенного уровня запроса на вычислительное устройство, у которого данный БПЛА находится в подчинении, об определении БПЛА для последующей миграции сервисов, маршрутов миграции и зон для подзарядки БПЛА.

2. Определение вычислительным устройством БПЛА для последующей миграции сервисов.

3. Определения вычислительным устройством маршрута миграции.

4. Определение зоны для подзарядки. Данный этап для успешной отправки БПЛА на подзарядку дополнительно должен включать следующие под этапы:

- 4.1. Определение самой зоны подзарядки. В качестве основных критериев для выбора зоны подзарядки должны стать расстояние между БПЛА и зоной подзарядки, вычисляемые на основе их координат в трехмерном пространстве, а также наличие свободных мест для посадки.

- 4.2. Отправка выбранной зоне подзарядки запроса на резервирование одного места на посадку БПЛА.



4.3. Отправка от выбранной зоны на вычислительное устройство ответа о возможности подзарядки БПЛА или отправка сообщения об отсутствии свободных мест для посадки БПЛА. При получении сообщения об отсутствии свободных мест для посадки процесс выбора зоны для подзарядки БПЛА повторяется.

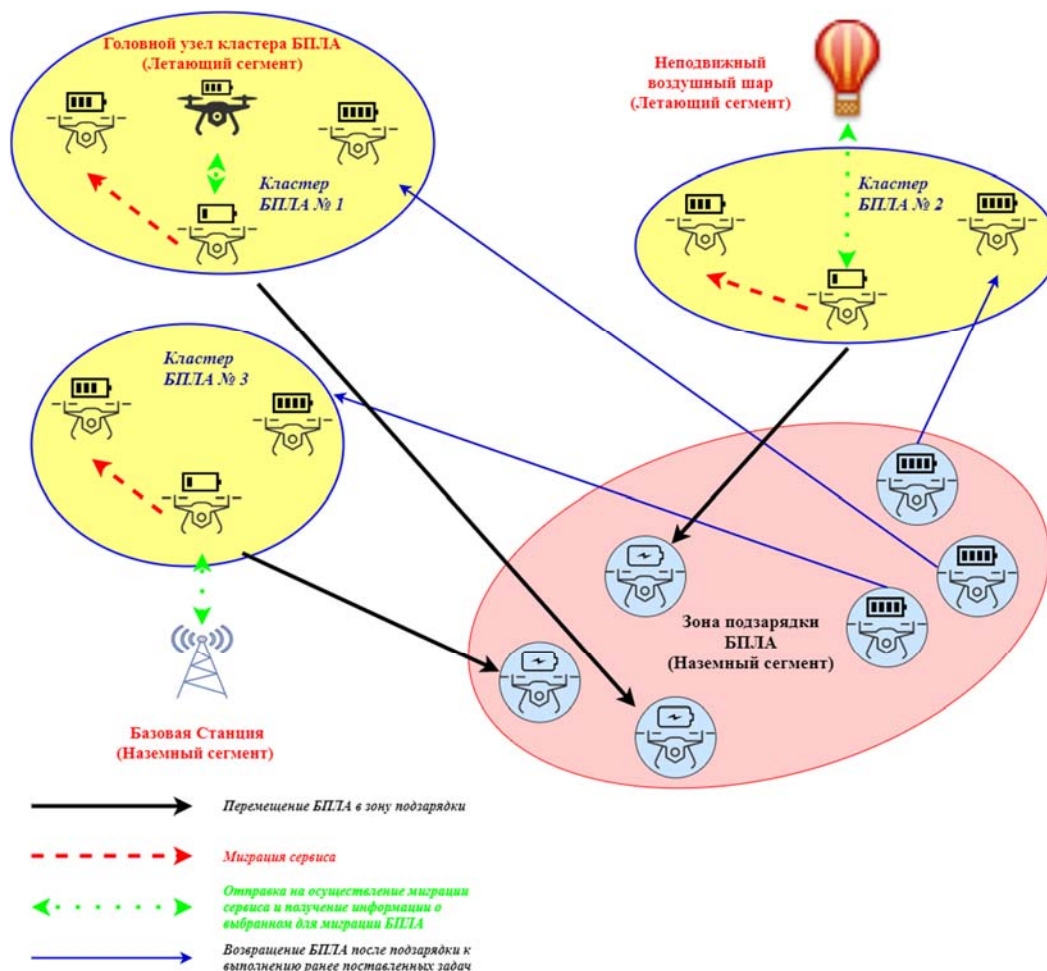


Рис. 1. Схема выполнения процессов миграции сервисов, отправки БПЛА на подзарядку и возвращения к выполнению ранее поставленных задач

5. Передача информации от вычислительного устройства на БПЛА о определении БПЛА для последующей миграции сервисов, маршрута миграции сервисов, и зоны для подзарядки.

6. Осуществление миграции сервисов.

7. Подтверждение успешной миграции сервисов. БПЛА на который необходимо мигрировать сервисы должен отправить информацию либо об окончании миграции, либо запрос на повторное осуществление миграции, либо информация об отсутствии свободных ресурсов для реализации сервиса. При получении информации об отсутствии свободных ресурсов шаги 1 (без отправления запроса об определении зоны для подзарядки БПЛА), 2, 3, 7 повторяются.

8. Отправка БПЛА на зону для подзарядки.

9. Возвращения БПЛА после полной зарядки внутренней батареи в состояние выполнения поставленных перед ним задач. Данный этап может заключаться



либо в возвращении БПЛА на определенный маршрут следования, либо возвращение БПЛА к определенному кластеру или группе БПЛА, к которым он ранее принадлежал.

Этап 4 может выполняться одновременно с этапами 2 и 3.

Схема предлагаемого в данной работе алгоритма (последовательности действий), осуществляемого при разряде встроенной батареи БПЛА, представлена на рис. 2.

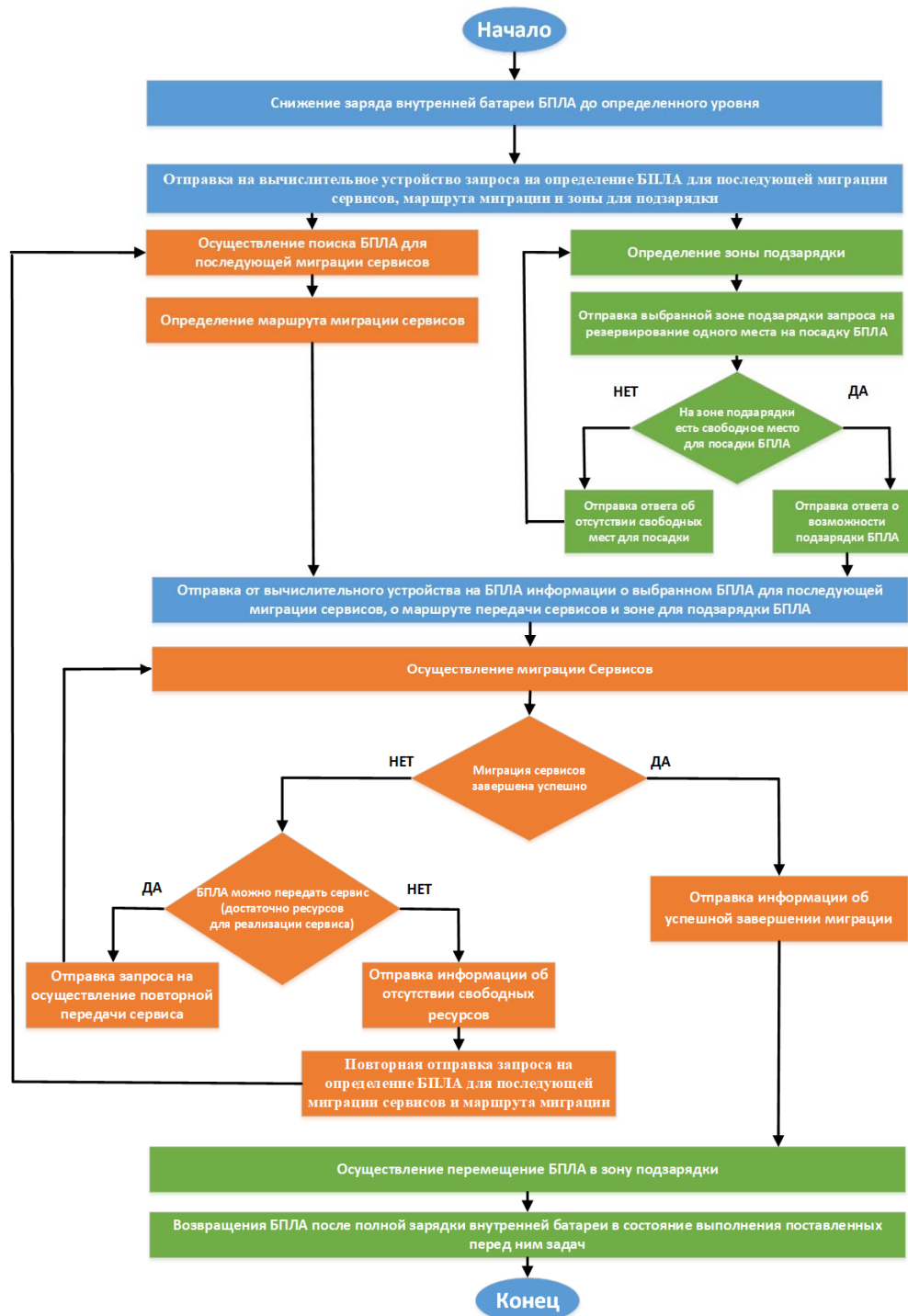


Рис. 2. Основные этапы предлагаемого алгоритма



В некоторых случаях миграция всех функций от БПЛА с разряженной внутренней батареей на один БПЛА может быть не возможно: на БПЛА может быть уже реализована часть из передаваемых функций или свободных ресурсов БПЛА может быть достаточно только для реализации части функций. В этом случае более эффективно было бы рассматривать миграцию сервисов и функций по отдельности (предлагаемый алгоритм должен выполняться отдельно для каждого вида сервиса или для каждой отдельной группы функций, рассмотренных ранее).

Заключение

В данной статье было подробно рассмотрены возможные способы организации архитектура сетей с БПЛА и основные сферы применения БПЛА. Было дано описание основных преимуществ, которые получают системы БПЛА от применения концепции SDN, а также нескольких способов реализации контроллеров SDN.

В статье были представлены группы функций, необходимых для успешного выполнения всех видов задач (связанных с 4 сферами применения) и для реализации в системах с БПЛА концепции SDN. Кроме того, было теоретически обосновано, потребность в миграции сервисов от одного БПЛА на другой и почему не выгодно реализовывать все возможные сервисы и функции на каждом БПЛА.

В статье также был предложен алгоритм (последовательность действий), осуществляемый при разряде внутренней батареи БПЛА, и включающий процессы определения БПЛА для последующей миграции сервиса, маршрута миграции сервиса, отправки БПЛА в зону подзарядки и возвращения БПЛА к выполнению поставленных задач.

В будущих работах планируется провести симуляцию выполнения процессов определения БПЛА для последующей миграции сервисов, маршрута миграции сервисов и определения зоны для подзарядки БПЛА.

Исследование выполнено в рамках выполнения ПНИ по государственному заданию СПбГУТ на 2021 год.

Литература

1. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Типография Любавич, 2011. 312 с.
2. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. Сети связи ПОСТ-NGN. СПб.: БХВ Петербург, 2014. 160 с.
3. M. Farhan, S. Jabbar, M. Aslam, M. Hammoudeh, M. Ahmad, S. Khalid IoT-based students interaction framework using attention-scoring assessment in eLearning M. Future Generation Computer Systems 79, pp. 909-919.
4. R. Ande, B. Adebisi, M. Hammoudeh, J. Saleem. Internet of Things: Evolution and Technologies from a Security Perspective. Sustainable Cities and Society 54, 101728. URL: https://www.researchgate.net/publication/334724035_Internet_of_Things_Evolution_and_Technologies_from_a_Security_Perspective
5. Мухизи С., Мутханна А. С., Киричек Р. В., Кучерявый А. Е. Исследование моделей балансировки нагрузки в программно-конфигурируемых сетях // Электросвязь. 2019. № 1. С. 23–29.
6. Атея А. А., Мутханна А. С., Кучерявый А. Е. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34–40.
7. J. McCoy and D. B. Rawat, "Software-Defined Networking for Unmanned Aerial Vehicular Networking and Security: A Survey," Electronics, vol. 8, no. 12, p. 1468, 2019.



8. Ateya A. A., Muthanna A., Kirichek R., Hammoudeh M., Koucheryavy A. Energy-and latency-aware hybrid offloading algorithm for UAVS. IEEE Access. 2019. T. 7. C. 37587–37600.
9. C. J. Katila, B. Okolo, C. Buratti, R. Verdone, 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.
10. V. Nikolayevich, A. Alzaghir, 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.

References

1. Kucheryavyj A. E., Prokop'ev A. V., Kucheryavyj E. A. Samoorganizuyushchiesya seti. SPb.: Tipografiya Lyubavich, 2011. 312 s.
2. Gol'dshtejn B. S., Kucheryavyj A. E. Seti svyazi POST-NGN. SPb.: BHV Peterburg, 2014. 160 s.
3. M. Farhan, S. Jabbar, M. Aslam, M. Hammoudeh, M. Ahmad, S. Khalid IoT-based students interaction framework using attention-scoring assessment in eLearning M. Future Generation Computer Systems 79, pp. 909-919.
4. R. Ande, B. Adebisi, M. Hammoudeh, J. Saleem. Internet of Things: Evolution and Technologies from a Security Perspective. Sustainable Cities and Society 54, 101728. URL: https://www.researchgate.net/publication/334724035_Internet_of_Things_Evolution_and_Technologies_from_a_Security_Perspective
5. Muhizi S., Muthanna A., Kirichek R. V., Koucheryavy A. Eu. Analysis and modeling of load balancing in software-defined networks // Electrosvyaz. 2019. No 1. pp. 23–29.
6. Ateya A. A., Muthanna A. S., Koucheryavy A. E. Intelligent core network for 5G and tactile internet systems based on software defined networks // Electrosvyaz. 2019. No 3. pp. 34–40.
7. J. McCoy and D. B. Rawat, "Software-Defined Networking for Unmanned Aerial Vehicular Networking and Security: A Survey," Electronics, vol. 8, no. 12, p. 1468, 2019.
8. Ateya A. A., Muthanna A., Kirichek R., Hammoudeh M., Koucheryavy A. Energy-and latency-aware hybrid offloading algorithm for UAVS. IEEE Access. 2019. T. 7. C. 37587–37600.
9. C. J. Katila, B. Okolo, C. Buratti, R. Verdone, 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.
10. V. Nikolayevich, A. Alzaghir, 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.

Коваленко Вадим Николаевич

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

Kovalenko Vadim N.

Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, kovalenkovadim1996@gmail.com

Родакова Анна Олеговна

аспирант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, rodakovaanya@gmail.com

Rodakova Anna O.

Postgraduate, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, rodakovaanya@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 S.

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, ammarexpress@gmail.com