

УДК 621.391.1

Определение маршрута миграции микросервиса в сети туманных вычислений

Тефикова М. Р. ✉, Кузьмина Е. А., Волков А. Н.

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

Постановка задачи: Новое поколение сетей связи дало основу для реализации и новых классов услуг, к одним из которых относятся услуги URLLC. В комплекс этих услуг входят такие концепции, как тактильный интернет. От среды передачи для URLLC требуется высокая пропускная способность и надежность каналов связи, а также ультранизкая задержка в сети. Для покрытия этих требований в архитектуру сетей внедряются различные технологии, такие как туманные вычисления и микросервисная архитектура. Последнее при этом чаще рекомендуют применять вместе с поддержкой миграции микросервисов между устройствами. Главная **цель работы** – определение эффективного пути до сервера назначения. **Используемые методы:** Проведение исследования на модельной сети со сбором реальной статистики нагрузки с узлов сети и ее анализом для определения наиболее эффективного маршрута миграции микросервиса по предложенному алгоритму на основе этих данных. **Новизна** представленного метода заключается в адаптации классического алгоритма выбора путей в графе для решения актуальной задачи выбора маршрута миграции микросервиса. **Результат:** Были определены параметры, которые необходимо учитывать для эффективной маршрутизации при миграции микросервиса, а также уровень архитектуры сети, который должен контролировать миграцию. Результаты показали, что предложенное решение является предпочтительным для применения в сравнении с протоколом AODV. **Теоретическая/Практическая значимость:** Количественно показано, что с использованием предложенного решения использование ресурсов процессора на узлах сети при миграции микросервиса совокупно можно сократить на 77 %, ресурсов оперативной памяти – на 14 %, долю потерянных пакетов на используемых каналах связи суммарно снизить на 7 %, что обеспечило бы более высокую надежность сети и увеличило бы ее производительность.

Ключевые слова: сети связи пятого поколения, туманные вычисления, микросервисная архитектура, миграция микросервисов, маршрутизация

Финансирование: Работа выполнена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1022040500653-0 от 16.02.2023 в ЕГИСУ НИОКТР.

Введение

Ранее сети связи не могли удовлетворить всем требованиям, соответствующим новым подходам межмашинного взаимодействия, однако сейчас наблюдается качественный скачок в возможностях современных сетей. Крайним выпущенным стандартом мобильной связи стал стандарт IMT-2020 (5G), который

Библиографическая ссылка на статью:

Тефикова М. Р., Кузьмина Е. А., Волков А. Н. Определение маршрута миграции микросервиса в сети туманных вычислений // Информационные технологии и телекоммуникации. 2023. Т. 11. № 1. С. 50–60. DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-1-50-60

Reference for citation:

Tefikova M., Kuzmina E., Volkov A. Migration Route Selection for a Microservice in a Fog Computing Network. *Telecom IT*. 2023;11(1):50–60. DOI: 10.31854/2307-1303-2023-11-1-50-60

сильно превзошел своих предшественников во всех направлениях. Скорость передачи данных, количество подключаемых к сети устройств, надежность сети – пятое поколение сетей связи обеспечило рост всех перечисленных показателей. Немаловажным является и то, что существенно снизилась задержка в сети [1]. Все это позволило приблизиться к осуществлению таких концепций, как тактильный интернет. Однако требования тактильного интернета к среде передачи весьма специфичны, например, задержка в сети не должна превышать 1 мс [2]. Более того, кроме изменения состава технологического фона человеческой жизни, изменяется и его масштаб. Неустанно растет количество устройств, подключенных к сети, а вместе с тем возрастает и количество передаваемого по сети трафика [3]. Классические подходы к построению сетей связи банально перестанут справляться с обслуживанием такого количества запросов, что повлечет и невозможность предоставления необходимого качества обслуживания (QoS, аббр. от англ. Quality of Service). Тем не менее, исследователями уже было предложено огромное количество инновационных решений, позволяющих избежать наихудшего сценария развития сетей связи. К их числу относятся концепция туманных вычислений (или – fog) и микросервисная архитектура. Однако внедрение новых решений в верхние уровни сетевой инфраструктуры требует частичного или полного изменения технологий, используемых на нижних уровнях. Так, для качественной работы сети, содержащей узлы с поддержкой микросервисной архитектуры, необходима и реализация миграции микросервисов между устройствами сети, а этот процесс вызывает необходимость разработки новых принципов маршрутизации, при его рассмотрении относительно различных топологий и архитектур сети.

Протокол маршрутизации AODV

AODV (аббр. от англ. Ad hoc On-Demand Distance Vector) – это открытый протокол реактивной маршрутизации, который используется в беспроводных самоорганизующихся сетях [4]. Он разработан для мобильных ad-hoc сетей MANET (аббр. от англ. Mobile Ad hoc Network), сенсорных сетей и других беспроводных сетей. AODV создает и поддерживает динамические маршруты между узлами.

Принцип работы протокола можно описать пошагово [5].

Шаг 1. При возникновении необходимости передачи данных отправляющий узел начинает поиск маршрута до целевого узла. Он отправляет RREQ-сообщение (аббр. от англ. Route Request) всем своим соседним узлам.

Шаг 2. Соседние узлы пересылают RREQ-сообщение своим собственным соседям, и это продолжается до тех пор, пока сообщение не достигнет узла, который знает маршрут до узла назначения, или имеет запись о более коротком маршруте к нему.

Шаг 3. Когда RREQ-сообщение достигает либо целевого узла, либо узла, которому известен маршрут до него, соответствующий узел отправляет RREP-сообщение (аббр. от англ. Route Reply) обратно исходному узлу, инициатору поиска маршрута. RREP-сообщение следует пути, указанному в RREQ-сообщении.

В процессе возврата RREP-сообщения каждый узел, встречающийся на пути, запоминает маршрут до отправляющего узла. После получения RREP-сообщения исходному узлу становится известен путь до получателя.

Одним из основных преимуществ протокола AODV является его эффективность в использовании ресурсов сети: поскольку маршруты устанавливаются только при необходимости, по сети не передается постоянный поток служебных сообщений, как при работе протоколов проактивной маршрутизации. Это позволяет снизить нагрузку на сеть и уменьшить требования к ресурсам узлов. Более того, по результатам работы протокола определяется кратчайший маршрут до узла назначения, что означает, что на передачу данных потребуется меньше переходов через транзитные узлы. AODV также обладает свойством самоорганизации, что позволяет узлам сети динамически адаптироваться к изменениям в ней.

Протокол AODV является предпочтительным и применимым для решения задачи определения маршрута миграции микросервиса в сети туманных вычислений, однако он не позволяет учесть все необходимые обстоятельства выбора пути до узла-получателя, поэтому существует необходимость в создании нового решения.

Определение параметров

Протокол AODV подразумевает выбор кратчайшего маршрута до узла назначения, причем кратчайший маршрут определяется по значению количества необходимых для совершения «прыжков» до получателя. Упомянутый показатель чаще упоминается как Hop-count. Один «прыжок» подразумевает переход через один узел сети, другими словами, один транзитный участок на пути пакета к месту назначения.

Однако в контексте задачи выбора маршрута для миграции микросервиса в рассматриваемой сети динамических туманных вычислений требуется учет большего количества параметров состояния сети, чем позволяет алгоритм протокола AODV. Это обусловлено тем, что узлы в сети представлены fog-устройствами, выполняющими различные вычислительные задачи, соответственно, затрачивающими на это свои вычислительные ресурсы. Необходимо сбалансированное распределение ресурсов в сети, поэтому следует выбирать такой маршрут, транзитные узлы которого не выполняют на момент миграции никаких ресурсоемких задач. Для этого главному серверу достаточно иметь сведения о загрузке центрального процессора (CPU, аббр. от англ. Central Processing Unit) и оперативной памяти (RAM, аббр. от англ. Random Access Memory) каждого узла сети.

Ко всему прочему, показатели состояния каналов связи между узлами сети так же важны для решения описанной задачи. Миграцию необходимо производить достаточно быстро и надежно, что требует от канала связи достаточно низкой задержки, причем потери пакетов также должны быть минимальными, иначе время, затрачиваемое на миграцию, будет расти.

Таким образом, важнейшими параметрами состояния сети для определения маршрута миграции микросервиса в текущей задаче являются:

- нагрузка CPU на узлах сети;
- нагрузка RAM на узлах сети;
- задержка на каналах связи между узлами;
- доля потерянных пакетов на каналах связи между узлами.

Отслеживая эти параметры, возможно найти такой путь миграции, который будет являться наиболее эффективным (с наименьшими задержками, наименьшей долей потерянных пакетов) и надежным за счет того, что транзитные узлы, которые охватывает маршрут, будут иметь достаточное количество ресурсов для перехода микросервиса через них, или их нагрузка не приблизится к предельной в отличие от остальных узлов сети, в процессе миграции в место назначения.

Описанные характеристики должны собираться в виде статистики по fog-зонам в реальном времени и постоянно. Должно быть предусмотрено временное или постоянное хранилище данных, куда будет записываться собранная статистика, чтобы, по необходимости, была возможность проанализировать нагрузку в зоне за определенный отрезок времени. Это также необходимо для прогнозирования нагрузок, которые будут возникать в fog-зонах в будущем.

Предлагаемый метод выбора маршрута

Обращаясь к теории графов, можно заметить, что у маршрута есть важная обобщающая характеристика – стоимость пути, также называемая Cost. Определение маршрута миграции должно происходить именно по стоимости пути, которая будет рассчитываться на основании описанных учитываемых параметров. Таблицы маршрутизации узлов сети можно представить с помощью графа, и тогда для поиска пути можно использовать алгоритмы нахождения путей в графе. Одним из классических алгоритмов решения такой задачи является алгоритм Дейкстры, который предполагает, что у каждого ребра графа есть свой вес, и продвижение к конечному узлу по графу должно происходить по ребрам с наименьшими весами среди возможных соседей узла отправления и транзитных узлов.

В задаче поиска пути миграции микросервиса нет необходимости искать пути от исходного узла графа ко всем остальным, так как место конечного назначения известно заранее, оно определяется по существующим алгоритмам. Поэтому необходимо найти лишь один путь, являющийся «кратчайшим» путем до узла назначения. За «кратчайший» путь принимается такой маршрут, стоимость которого минимальна среди остальных доступных.

Однако стоимости ребер заранее неизвестны. Их необходимо рассчитать, и после запускать работу алгоритма. В общем случае рассматриваемую сеть туманных вычислений можно представить графом, изображенным на рисунке 1. Вершина 1 – узел сети, с которого необходимо произвести миграцию микросервиса, а вершина n – узел сети, на который микросервис должен мигрировать. Граф является направленным, так как микросервис точно должен проходить каждый узел только по одному разу в процессе миграции, иными словами, не должно образовываться петель в маршрутах.

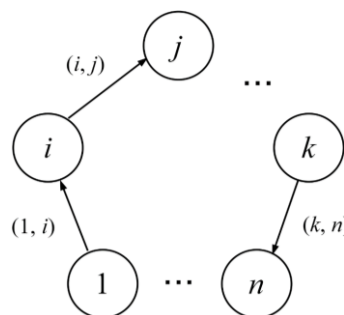


Рис. 1. Обобщенный граф топологии рассматриваемой сети

На рисунке 1 представлена обобщенная топология рассматриваемой сети. Для определения кратчайшего маршрута от узла 1 до узла n необходимо найти все веса ребер, встречающихся на пути до узла назначения. Стоимость ребра в этом случае должна учитывать не только характеристики самого ребра, но и характеристики узла, как было выяснено ранее.

Тогда стоимость ребра или канала связи (i, j) будет определяться следующим образом:

$$f_{i,j} = edgeOptions_{i,j} + topOptions_j, \quad (1)$$

где $edgeOptions_{i,j}$ – параметры, описывающие состояние ребра; $topOptions_j$ – параметры, описывающие состояние вершины, в которое ведет ребро.

Упомянутые параметры ранее были определены как нагрузка CPU узла j , нагрузка RAM узла j , задержка Delay (D) на канале связи (i, j) , доля потерь пакетов PacketLoss (PL) на канале связи (i, j) . Все эти характеристики имеют разные единицы измерения и разные приоритеты, потому их необходимо привести к эквивалентному виду.

Исходя из (1), стоимость всего маршрута может быть выражена как:

$$F_x(1, n) = \sum f_{i,j}, \quad (2)$$

и искомый путь миграции определяется выражением:

$$\min\{ F_x(1, n) \}. \quad (3)$$

Возвращаясь к параметрам, описывающим состояние сети, как уже было отмечено, необходимо учесть, что каждый из выбранных показателей имеет свою величину влияния на результат и свои единицы измерения. Необходимо определить важность каждого параметра по отношению к остальным, так как не все они в одинаковой мере влияют на выбор того или иного пути к устройству назначения. Важность параметра в этом контексте называется его весом. Веса параметров должны определяться с помощью методов сравнения совокупности объектов друг с другом, исходя из условий поставленной задачи; к числу таких подходов относится метод парных сравнений.

Метод парных сравнений предполагает сравнение всех объектов во всех возможных парах среди этих объектов по заданному критерию. В рамках оценки необходимо построить матрицу, далее заполнить ее по результатам сравнений. Существует при этом несколько различных способов составления такой матрицы. Наиболее точным является способ, заключающийся в вычислении суммы коэффициентов по столбцам матрицы, с последующим вычислением обратного значения полученных сумм и нормализацией итоговых значений. Именно этот способ и был выбран в рамках решения текущей задачи.

Полученная матрица парных сравнений приведена в таблице 1, где CPU, RAM, D, PL – нагрузка процессора j -го узла (%), нагрузка оперативной памяти j -го узла (%), задержка канала связи (мс), доля потерянных пакетов при передаче данных по каналу связи (%), соответственно.

Таблица 1 – Матрица парных сравнений параметров состояния сети

Параметры	CPU	RAM	D	PL	Итого
CPU	1	1,5	1	1	–
RAM	0,5	1	0,5	0,5	–
D	1	1,5	1	1	–
PL	1	1,5	1	1	–
S (сумма)	3,5	5,5	3,5	3,5	–
$\frac{1}{S}$ (обратное сумме)	0,28571	0,18182	0,28571	0,28571	1,03896
w (вес)	0,275	0,175	0,275	0,275	1

В таблице 1 представлены результаты расчета весов выбранных параметров. Исходя из полученных данных, CPU, Delay, PacketLoss имеют веса 0,275, а RAM – 0,175. В контексте рассматриваемой задачи это объясняется следующими суждениями.

Во-первых, нагрузка процессора узла имеет больший приоритет, чем нагрузка оперативной памяти узла, так как мощность процессора необходима для обработки процесса получения микросервиса и его пересылки к следующему участнику маршрута.

Во-вторых, нагрузка процессора узла приоритетом эквивалентна задержке канала связи и оценке потерянных пакетов на этом канале связи, так как параметры в вопросе выбора маршрута имеют одинаковую значимость.

В-третьих, нагрузка оперативной памяти узла имеет меньший приоритет по отношению к задержке на канале связи и оценке потерянных пакетов на этом канале связи, так как важно произвести миграцию надежно и быстро, чего не позволит высокая задержка и высокий процент потерь пакетов.

В-четвертых, задержка канала связи и доля потерянных пакетов на этом канале связи имеют идентичную значимость.

Таким образом, целевая функция нахождения стоимости одного ребра (i, j) графа (1), с найденными весами и определенными параметрами состояния сети будет иметь вид:

$$f_{i,j} = CPU_j \cdot w_{CPU} + RAM_j \cdot w_{RAM} + D_{i,j} \cdot w_D + PL_{i,j} \cdot w_{PL}, \quad (4)$$

где $w_{CPU} = w_D = w_{PL} = 0,275$; $w_{RAM} = 0,175$.

На рисунке 2 представлен предлагаемый алгоритм выбора маршрута миграции микросервиса.

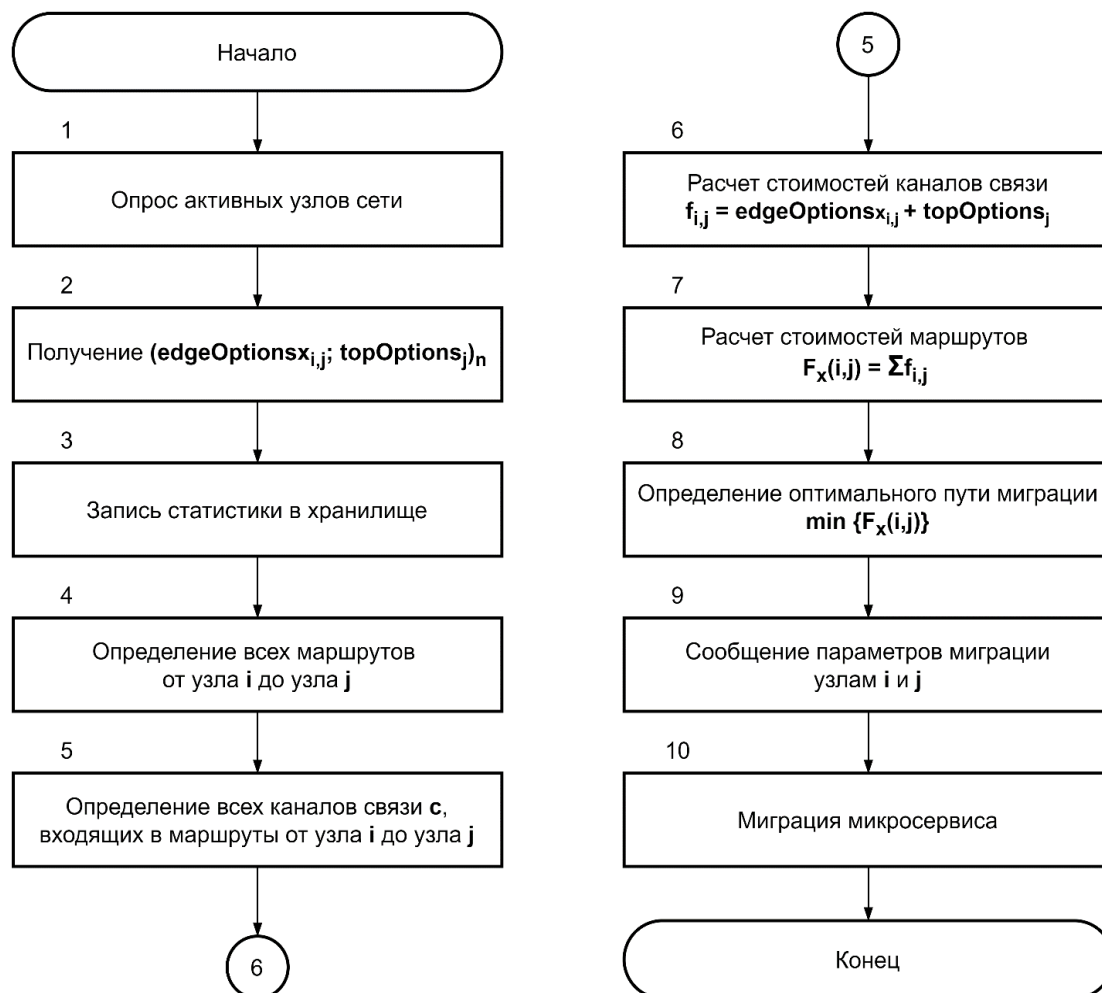


Рис. 2. Предлагаемый алгоритм выбора маршрута миграции микросервиса

Стоит отметить, что уровнем архитектуры сети, контролирующим этот процесс (см. рисунок 2), должен являться оркестратор туманных вычислений. Данная задача попадает под список причин его использования и внедрения, ведь именно оркестратор занимается распределением нагрузки между туманными узлами, прогнозированием, определением приоритетности различных задач, выполняемых fog-узлами и др.

Анализ результатов тестирования

Для тестирования работы предлагаемого алгоритма определения маршрута миграции и оценки эффективности его работы было проведено 5 экспериментов на модельной сети туманных вычислений, изображенной на рисунке 3, где fog-узлы управляются микро-облаком, и производится мониторинг их ресурсов с помощью оркестратора, функционирующего так же на уровне микрооблака. Сбор

статистики производится через опрос оркестратором REST API-сервера, статистика записывается в хранилище, решения о миграции принимаются непосредственно оркестратором.

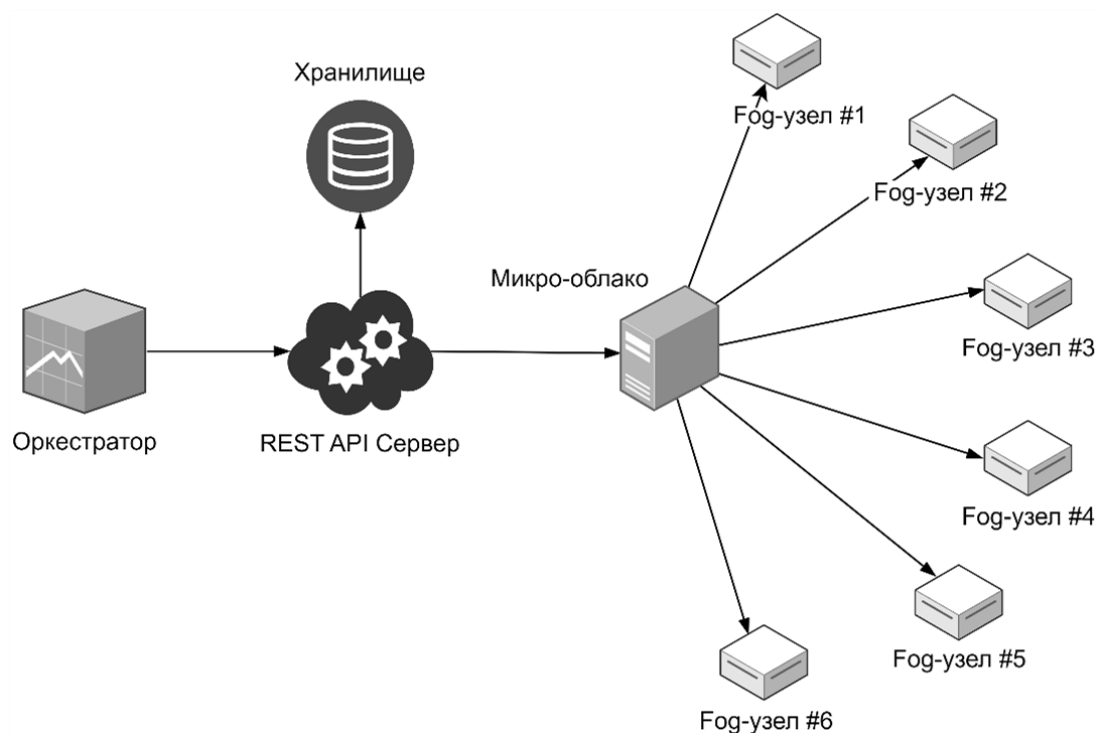


Рис. 3. Схема модельной сети

Для проведения экспериментов узлы модельной сети были запущены и введены в работу. В рамках этих экспериментов они подвергались искусственному увеличению и снижению нагрузки в целях сбора объективной статистики по работе двух алгоритмов маршрутизации: классического алгоритма выбора маршрута протокола AODV, который основывается на метрике Hop-count, т. е. оценивает пути согласно выбору кратчайшего маршрута до сервера назначения, а также предлагаемого алгоритма определения пути миграции, который основывается на поиске маршрута по менее загруженным каналам связи, соединяющим и менее нагруженные узлы сети.

Сводные графики по показателям нагрузки CPU, нагрузки RAM, Delay и PacketLoss при использовании упомянутых алгоритмов при проведенных экспериментах представлены на рисунке 4. Результаты показали, что предлагаемый алгоритм выбирает маршрут, менее подверженный потере передаваемых пакетов, превосходство над алгоритмом протокола AODV можно оценить в 7 % по данному показателю. Также предлагаемый алгоритм учитывает нагрузку на каждом узле маршрута, что подтверждают 77 и 14 % снижения затрачиваемых ресурсов CPU и RAM на транзитных узлах сети, соответственно. При этом показатели задержки увеличились на 4 %, что объясняется тем, что ранее параметры CPU и Delay были определены как равнозначные в рассматриваемой задаче, а узлы сети подвергались высоким нагрузкам в 90 % использования CPU. При этом задержка каналов связи не принимала столь высоких значений при измерениях. Соответственно, различия в параметрах были велики, и в этом случае рост

нагрузки процессора вызывал и сильный рост стоимости всего маршрута. Однако алгоритм позволяет регулировать веса параметров и их список так, как необходимо для конкретной задачи.

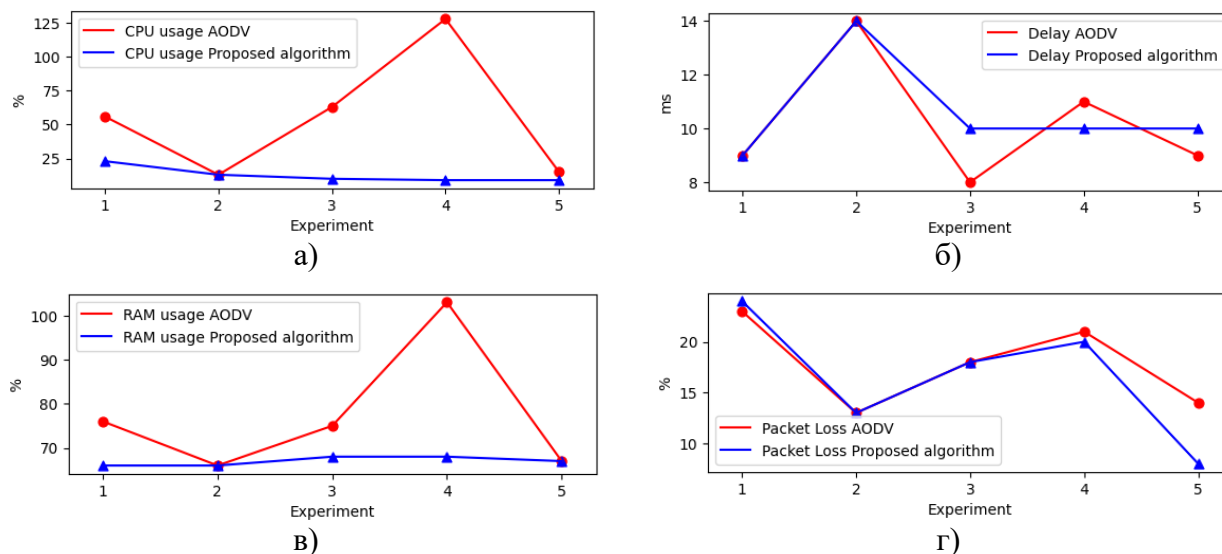


Рис. 4. Графики показателей нагрузки при использовании двух алгоритмов:

а) ресурсы центрального процессора узла; б) задержка канала связи; в) ресурсы оперативной памяти узла; г) доля потерянных пакетов на канале связи

Экспериментально доказанная эффективность алгоритма дает понимание, что при осуществлении миграции микросервисов в сети динамических туманных вычислений при выборе маршрута миграции микросервиса оправданно использовать именно предлагаемый алгоритм. Иными словами, он является предпочтительным для решения этой задачи, так как показывает меньшее использование ресурсов сети при миграции микросервиса по маршруту, который алгоритм определяет, т. е. предлагаемое решение учитывает особенности рассматриваемой сети и повышает ее производительность.

Выводы

В данной работе был предложен алгоритм выбора маршрута миграции микросервиса в сети туманных вычислений. Определен уровень архитектуры, управляющий процессом миграции. Разработанное решение было протестировано вместе с уже классическим подходом, который используется протоколом AODV, и по полученным результатам ясно, что предлагаемый алгоритм эффективнее алгоритма протокола AODV для решения задачи поиска пути миграции микросервиса. С помощью повышения производительности сети, которая наблюдается в процессе миграции микросервиса при использовании предлагаемого алгоритма, можно добиться минимизации отказов сети и предоставления необходимого QoS, что является бесспорно важным вопросом при развертывании сетей связи 5G.

Литература

1. Rec. ITU-R M.2083-0 (09/2015). IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.
2. Черкасова С. А., Анищенко И. Е., Идиятова Д. И., Валиев Р. И., Хуснутдинова Г. М. URLLC – будущее мобильной связи пятого поколения // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций. Оптические технологии в телекоммуникациях: Материалы XX Международной научно-технической конференции, XVI Международной научно-технической конференции (Уфа, 20–22 ноября 2018). Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2018. Т. 1. С. 309–310.
3. Current IoT Forecast Highlights // Transforma Insights. URL: <https://transformainsights.com/research/forecast/highlights> (Accessed 10.05.2023)
4. Perkins C., Belding-Royer E., Das S. RFC 3561: Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing // RFC Editor. 2003. DOI: 10.17487/RFC3561
5. Мутханна А. С. Исследование трафика и протоколов маршрутизации в беспроводных сетях. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2016. 176 с.

Статья поступила 02 октября 2023 г.
Одобрена после рецензирования 18 октября 2023 г.
Принята к публикации 22 ноября 2023 г.

Информация об авторах

Тефикова Мерьем Ринатовна – студент института магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (кафедра сетей связи и передачи данных).
E-mail: tmrvmr@mail.ru

Кузьмина Екатерина Алексеевна – студент института магистратуры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича (кафедра сетей связи и передачи данных).
E-mail: rkmea@mail.ru

Волков Артем Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: artem.nv@sut.ru

Migration Route Selection for a Microservice in a Fog Computing Network

M. Tefikova[✉], E. Kuzmina, A. Volkov

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

Purpose. The new generation of communication networks has provided the basis for the realization of new classes of services, one of which are URLLC services. These services include concepts such as Tactile Internet. The transmission medium for URLLC requires high bandwidth and reliability of communication channels as well as ultra-low latency in the network. To cover these requirements, various technologies, such as fog computing and microservice architecture, are introduced into the architecture of networks. The latter is more often recommended to be used together with support for microservice migration between devices. A related goal is to determine the efficient route to the destination server. **Methods.** Conducting research on a model network with the collection of real load statistics from the network nodes and their analysis to determine the most efficient migration route for microservice according to the proposed algorithm based on these data. **Novelty.** The novelty of the presented method consists in adapting the classical algorithm of route selection in a graph to solve the actual problem of microservice migration route selection. **Results.** The parameters that need to be considered for efficient routing during microservice migration and the level of network architecture that should control the migration were defined. The results have shown that the proposed method is preferred over the AODV protocol. **Practical relevance.** It is quantitatively shown that using the proposed method the CPU resources consumption on the network nodes during microservice migration can be reduced total by 77 %, the RAM resources usage by 14 %, the percentage of lost packets on the used communication channels can be reduced total by 7 %, which would provide higher network reliability and increase its performance.

Key words: fifth generation communication networks, fog computing, microservice architecture, microservice migration, routing

Funding: the article was prepared within the framework of applied scientific research of SPbSUT, registration number 1022040500653-0 in the EGISU R&D, 16.02.2023.

Information about Authors

Meriem Tefikova – Graduate Student (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: tmrvmr@mail.ru

Ekaterina Kuzmina – Graduate Student (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: rkmea@mail.ru

Artem Volkov – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: artem.nv@sut.ru