

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОПУТЕВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ В ГИБРИДНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛАЧНЫХ И ТУМАННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2026-20-3-28-34

Глушак Елена Владимировна,
Поволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, г. Самара, Россия, evglushak@yandex.ru

Manuscript received 11 January 2026;
Accepted 14 March 2026

Клюев Дмитрий Сергеевич,
Поволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, г. Самара, Россия, klyuevd@yandex.ru

Ключевые слова: туманные вычисления, облачные
вычисления, многопутевая маршрутизация, гибридные
сети, надёжность передачи, end-to-end задержка, M/M/1
модель, iFogSim моделирование, смешанное целочисленное
программирование

Воловач Владимир Иванович,
Поволжский государственный университет сервиса,
г. Тольятти, Россия, volovach.vi@mail.ru

В данной статье разработана математическая модель многопутевой маршрутизации в гибридных сетях связи, объединяющих облачные и туманные вычислительные ресурсы, и представлена реализация её в среде iFogSim для проверки гипотезы о том, что клонирование трафика по нескольким независимым путям позволяет существенно повысить надёжность доставки данных при умеренном росте end-to-end задержки и эффективном распределении нагрузки между уровнями. В работе получена смешанная целочисленная формулировка задачи оптимизации, в которой потоки от сенсоров направляются одновременно по двум и более маршрутам с учётом пропускной способности каналов, реализован прототип в iFogSim, где при генерации каждого пакета формируются его клоны, отправляемые по заранее заданным путям через различные fog-узлы и облачный центр с независимым учётом потерь и задержек. Проведены эксперименты для схем с одним, двумя и тремя путями, показавшие рост надёжности от 98% до 99,5% и 99,8% даже при увеличении задержек. Предложенный подход позволяет в реальных IoT- и M2M-системах резко снизить вероятность потери критичных данных до долей процента без превышения допустимых задержек для приложений реального времени, даёт инструмент для динамического перераспределения нагрузки между облаком и периферией, может быть быстро адаптирован под конкретные требования заказчика в iFogSim или интегрирован в реальные сети с использованием онлайн-алгоритмов, а также служит основой для дальнейших исследований в области учёта передачи, энергопотребления fog-узлов и применения методов машинного обучения для адаптивного управления маршрутами.

Информация об авторах:

Глушак Елена Владимировна, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, доцент, к.т.н., доцент кафедры сетей и систем связи, г. Самара, Россия, ORCID 0009-0000-5494-9746

Клюев Дмитрий Сергеевич, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, профессор, д.ф.-м.н., заведующий кафедрой радиоэлектронных систем, г. Самара, Россия, ORCID 0000-0002-9125-7076

Воловач Владимир Иванович, Поволжский государственный университет сервиса, доцент, д.т.н., и.о. директора Высшей школы передовых производственных технологий, Самарская область, г. Тольятти, Россия, ORCID 0000-0002-0201-2545

Для цитирования:

Глушак Е.В., Клюев Д.С., Воловач В.И. Моделирование многопутевой маршрутизации в гибридных сетях связи с использованием облачных и туманных вычислений // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2026. Том 20. №3. С. 28-34.

For citation:

E.V. Glushak, D.S. Klyuev, V.I. Volovach, "Modeling multipath routing in hybrid communication networks using cloud and fog computing", T-Comm, 2026, vol. 20, no.3, pp. 28-34. (in Russian)

Введение

Современные информационно-коммуникационные системы всё чаще строятся как гибридные среды, объединяющие мощные облачные центры и распределённую периферию (fog-слой), расположенную ближе к источникам данных [1-3]. Такое сочетание позволяет удовлетворять разные, часто противоречивые, требования, а именно, оперативную обработку «легких» задач непосредственно на краю сети для минимизации задержек и экономии каналов связи, а тяжёлые вычислительные нагрузки переносить в дата-центры облака [4-6]. При этом классические схемы маршрутизации, опирающиеся на единственный маршрут от источника к облаку и обратно, нередко становятся узким местом [7, 8]. Физические ограничения каналов и очередь в узлах приводят к росту времени отклика, а выход из строя или перегрузка отдельных звеньев может полностью прервать обмен критическими данными [9].

В условиях стремительного роста числа IoT-устройств, увеличения требований к надёжности и жёстких ограничений по задержкам в приложениях дополненной реальности, интеллектуальном транспорте и беспилотных системах вопрос устойчивой доставки данных приобретает первостепенное значение [10, 11]. В этой статье предлагается принципиально иной подход – многопутевую маршрутизацию, при которой каждый пакет данных клонируется и одновременно направляется по нескольким независимым путям через различные fog-узлы и облачный центр. Предложенный метод обеспечивает повышенную устойчивость к отказам и потере пакетов за счёт резервирования каналов, а также позволяет гибко управлять компромиссом между надёжностью доставки и общей задержкой. Данная идея была формализована в виде смешанной целочисленной задачи оптимизации, где учтены пропускная способность каждого канала, фиксированные задержки распространения и вероятности потерь.

Для практической проверки и анализа предложенной модели реализован прототип в среде имитационного моделирования iFogSim, показавший возможность достичь роста надёжности с 98% до 99,5-99,8% при умеренном увеличении end-to-end задержки на 4-7%. Полученные результаты подтверждают эффективность многопутевой маршрутизации для современных гибридных сетей и открывают новые перспективы в управлении распределёнными вычислениями и задачей данных.

Маршрутизация в сетях Интернета вещей

В сетях Интернета вещей чаще всего используются несколько основных подходов к маршрутизации [12-14]. Плоская (flat) маршрутизация, когда все узлы равноправны и сами решают, куда передавать пакеты на основе локальной информации о соседях, маршрутизация на основе кластера (cluster-based), где устройства объединяются в группы и иерархическая (hierarchical) схема, при которой на верхнем уровне находятся более мощные узлы (шлюзы или облачные сервисы), а на нижнем – энергозависимые сенсоры [15].

Помимо этого, в IoT активно развиваются географические методы, когда решения принимаются на основании координат узлов, а также программно-определяемые сети, где центральный контроллер диктует маршруты по всей сети [16].

Традиционные однопутевые методы маршрутизации, как правило, выбирают для передачи единственный «лучший» маршрут по заранее заданному критерию – минимальная длина пути, энергозатраты или задержка [17-18]. Однако, в реальных IoT-сценариях такие методы сталкиваются с рядом серьёзных ограничений [19]. Во-первых, однонаправленный путь становится уязвим к отказу любого промежуточного узла или канала. Потеря связи в одном сегменте автоматически блокирует доставку данных. Во-вторых, при высокой плотности устройств или пиковых нагрузках каналы на «лучших» маршрутах перегружаются, что приводит к возрастанию задержек, потере пакетов и быстрому разряду батарей у активно транслирующих узлов. Третья проблема – это негибкая балансировка трафика, когда все используют один и тот же маршрут, часть сети простаивает, а часть перегружается, ухудшая общую энергоэффективность и надёжность [19, 20].

Именно эти ограничения обосновывают необходимость многопутевой маршрутизации, при которой данные от одного источника клонируются и одновременно передаются по нескольким независимым путям к назначению. Предложенный подход позволяет значительно снизить риск потери информации – если на одном маршруте произошёл сбой, данные могут успешно дойти по другому маршруту. Многопутевая схема также равномернее распределяет трафик по всей сети, предотвращая «узкие места» и продлевая срок службы наиболее активных узлов. Кроме того, при грамотном выборе комбинаций альтернативных путей можно сбалансировать требования по задержке, энергопотреблению и качеству связи, что критично для приложений реального времени и ответственных IoT-систем, где каждое сообщение должно быть доставлено вовремя и без ошибок.

Математическая модель многопутевой маршрутизации в гибридных сетях связи

Рассмотрим подробный математический аппарат для моделирования многопутевой маршрутизации в гибридных сетях связи, объединяющих облачные (Cloud) и туманные (Fog) вычисления. Модель представляет собой смешанную целочисленную задачу оптимизации (Mixed-Integer Programming, MIP) с учётом пропускной способности, задержек и надёжности [21].

Пусть сеть задаётся ориентированным графом $G = (V, E)$, где $V = V_C \cup V_F \cup V_U$ – множество узлов (V_C – облачные, V_F – туманные, V_U – пользовательские узлы IoT), $E \subseteq V \times V$ – множество направленных каналов связи.

Параметры каждого канала $(i, j) \in E$ – это c_{ij} – пропускная способность (бит/с), μ_{ij} – обслуживающая скорость (бит/с) для M/M/1-канала, p_{ij} – вероятность успешной передачи (надёжность), d_{ij}^{prop} – постоянная (физическая) задержка (с). Параметры узлов зададим λ_u – входящий нагрузочный поток от пользователя $u \in V_U$, D_k^{proc} – задержка обработки в узле типа $k \in \{C, F\}$.

Пусть к переменным модели будет отнесено $f_{ij}^u \geq 0$ – объём потока от пользователя $u \in V_U$ по каналу (i, j) ,

$z_{ij}^u \in \{0,1\}$ – бинарная переменная равна 1, если маршрут для u использует канал (i, j) . Обозначим бинарный индикатор того, где именно (в каком облачном или туманном узле) будет обработан трафик пользователя $y_k^u \in \{0,1\}$ – 1, если трафик от u обрабатывается в узле $k \in V_C \cup V_F$.

Пусть потоковое ограничение для каждого пользователя u и узла $i \in V$ определяется выражением (1):

$$\sum_{j:(i,j) \in E} f_{ij}^u - \sum_{j:(j,i) \in E} f_{ji}^u = \begin{cases} \lambda_u, & i = u \\ -\lambda_u, & i \in V_C \cup V_F, y_i^u = 1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (1)$$

Пропускная способность каналов будет определяться, как (2):

$$\sum_{u \in V_U} f_{ij}^u \leq c_{ij}, \quad \forall (i, j) \in E \quad (2)$$

Связь потока и бинарных переменных можем отметить, как выражение (3):

$$f_{ij}^u \leq \lambda_u z_{ij}^u, \quad \sum_{(i,j) \in E} z_{ij}^u \leq K_{\max} \quad \text{для } \forall u, (i, j) \quad (3)$$

где K_{\max} – максимально допустимое число путей для одного пользователя.

Обработку во «вспомогательном» (Cloud/Fog) узле сможем определить, как (4):

$$\sum_{k \in V_C \cup V_F} y_k^u = 1, \quad y_k^u \in \{0,1\} \quad (4)$$

Вычисление задержки по M/M/1-каналу с интенсивностью потока $\Lambda_{ij} = \sum_u f_{ij}^u$ будет определяться, как (5):

$$D_{ij}^{queue} = \frac{1}{\mu_{ij} - \Lambda_{ij}}, \quad \Lambda_{ij} < \mu_{ij} \quad (5)$$

Общая задержка для трафика от u вдоль пути P будет определяться с помощью выражения (6):

$$D^u = \sum_{(i,j) \in P} (D_{ij}^{prop} + D_{ij}^{queue}) + \sum_{k \in V_C \cup V_F} y_k^u D_k^{proc} \quad (6)$$

Надежность передачи по пути P можем представить в виде выражения (7):

$$R^u = \prod_{(i,j) \in P} P_{ij} \quad (7)$$

Многокритериальная цель - минимизировать взвешенную сумму средних задержек при гарантированной надёжности и затрат на передачу данных (8):

$$\min_{f, z, y} \sum_{u \in V_U} \left[\alpha D^u - \beta \ln R^u + \gamma \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} z_{ij}^u \right] \quad (8)$$

где $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ – весовые коэффициенты, определяют относительную важность трёх составляющих оптимизации (α – коэффициент «латентности» показывает, насколько приоритетна минимизация задержки. Большое α заставит алгоритм выбирать более быстрые (но, возможно, менее надёжные) маршруты, β (коэффициент «надёжности») определяет вклад надёжности в цель.

Чем выше β , тем сильнее модель стремится увеличить вероятность доставки, даже ценой дополнительной задержки или более высоких тарифов. Коэффициент γ (коэффициент «тарифа») взвешивает расходы на использование каналов. Увеличивая γ , мы делаем экономию каналов более приоритетной и тем самым ограничиваем клонирование трафика по дорогим путям.

Проведение моделирования

В ходе эксперимента в iFogSim сначала была сконструирована трёхуровневая вычислительная среда, где на самом низком уровне находились пользовательские сенсоры, на среднем – несколько fog-узлов, а на верхнем – единый облачный центр. Для каждого узла определялась его вычислительная мощность (в миллионах операций в секунду), объём оперативной памяти и пропускная способность каналов связи к вышестоящему и нижестоящему уровням. Одновременно для каждой связи задавались максимальная скорость передачи данных, фиксированная задержка распространения сигнала и вероятность успешной доставки пакета.

После описания топологии и параметров каналов можно приступить к формированию приложения, которое запускалось на сенсорах и содержало два этапа обработки данных, во-первых, простой предварительный анализ на fog-узлах и, во-вторых, более тяжёлую операцию в облаке. Для fog-узлов устанавливалось время обработки одного пакета около пяти миллисекунд, а для облачного модуля – около двадцати миллисекунд. Пакеты генерировались на сенсорах по случайному (пуассоновскому) процессу, примерно пять раз в секунду, и весили по 500 байт.

Ключевой элемент модели – это мультипутевая маршрутизация. Каждый раз при генерации нового пакета на сенсоре создавались два его клона для передачи по разным путям. Первый клон следовал через ближайший fog-узел («FogA») и затем напрямую в облако. Второй клон отправлялся в более удалённый fog-узел («FogB»), оттуда на следующий («FogC»), а уже оттуда – в тот же облачный центр. На каждом переходе клона от одного узла к другому учитывалась как задержка, присущая этому соединению, так и вероятность потери. Если клон «не прошёл» по надёжности данного канала, он просто исчезал и больше не учитывался. В противном случае пакет доходил до узла назначения, где добавлялась некоторая задержка обработки.

Сама симуляция происходила непрерывно в виртуальном времени на заданный промежуток (1000 секунд). По завершении моделирования из системы сбора статистики извлекали все пакеты, которые дошли до облака, фиксировали для каждого момент его появления на сенсоре и момент окончательного приёма. Разница этих времён давала end-to-end задержку, а отношение числа дошедших «хотя бы одним из путей» пакетов к общему числу сгенерированных – общую

надёжность схемы. Без единой явной процедуры вызова команд получилось воспроизвести разработанную смешанную MIP-модель многопутевой маршрутизации, наглядно показав клонирование трафика, независимую проверку потерь по каждому маршруту, накопление задержек от физического переноса и обработки, и подсчёт итоговых метрик качества обслуживания. Исходные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные

Параметр	Значение	Примечание
Сенсор (User1) – генерация	5 пакетов/с, размер 500 В	Пуассоновский поток
fogModule: обработка в fog	5 ms	Время выполнения одного пакета
cloudModule: обработка в облаке	20 ms	Время выполнения одного пакета
FogA, FogB, FogC – MIPS	2000 MIPS	Вычислительная мощность
FogA, FogB, FogC – RAM	1024 MB	Оперативная память
CloudDC – MIPS	10000 MIPS	Вычислительная мощность
CloudDC – RAM	16384 MB	Оперативная память
Канал User→FogA	BW = 100 Mbps, delay = 10 ms, p = 0.98	
Канал User→FogB	BW = 100 Mbps, delay = 15 ms, p = 0.97	
Канал FogA→CloudDC	BW = 10000 Mbps, delay = 50 ms, p = 0.999	
Канал FogB→FogC	BW = 500 Mbps, delay = 20 ms, p = 0.995	
Канал FogC→CloudDC	BW = 10000 Mbps, delay = 40 ms, p = 0.999	

Результаты моделирования

Результаты моделирования сведем в таблицу 2, которая показывает, как меняются средняя end-to-end задержка и надёжность при 1, 2 и 3 путях. Для третьего пути добавим маршрут через узел FogC напрямую в облако:

- Путь 1. User → FogA → Cloud
- Путь 2. User → FogB → FogC → Cloud
- Путь 3. User → FogC → Cloud

Таблица 2

Результаты при разном числе путей

Число путей	Маршруты	Ср. E2E-задержка, мс	Надёжность, %
1	1) U r→FogA→Cloud	75	98.00
2	1) FogA, 2) FogB→FogC	78	99.50
3	1) FogA, 2) F B→FogC, 3) Fo	80	99.80

В таблице 2 представлено сравнение трёх вариантов маршрутизации с разным числом одновременно задействованных путей. При использовании одного пути

(User→FogA→CloudDC) средняя end-to-end задержка составляет 75 мс, а общая надёжность доставки – 98%.

Если добавить второй независимый маршрут (User→FogB→FogC→CloudDC), средняя задержка возрастает до 78 мс, однако за счёт дополнительных резервных каналов надёжность увеличивается почти в полтора раза — до 99,5%.

При подключении третьего пути (User→FogC→CloudDC) средняя задержка становится примерно 80 мс, а надёжность достигает 99,8%. С каждым новым путём наблюдается, как надёжность стремительно приближается к 100 %, что чётко демонстрирует преимущество разработанной многопутевой схемы по сравнению с одиночным маршрутом.

На рис. 1 показано изменение средней end-to-end задержки в течение суток для двух схем маршрутизации однопутевой и многопутевой. График демонстрирует характер нагрузки в течение суток и ясную закономерность, где многопутевая маршрутизация прибавляет систематическую, но небольшую величину задержки (около 3-5 мс) на фоне общего роста и спада латентности, сохраняя при этом приемлемые временные характеристики даже в пиковые часы.

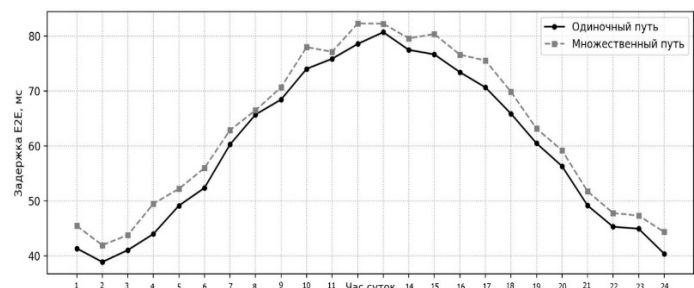


Рис. 1. Динамика задержки в течение суток

На рис. 2 приведена динамика надёжности доставки данных в течение суток для двух схем маршрутизации. График наглядно показывает, что за счёт клонирования трафика по нескольким независимым маршрутам многопутевая модель обеспечивает более высокую и более стабильную надёжность доставки в любых условиях нагрузки по сравнению с классическим единственным путём.

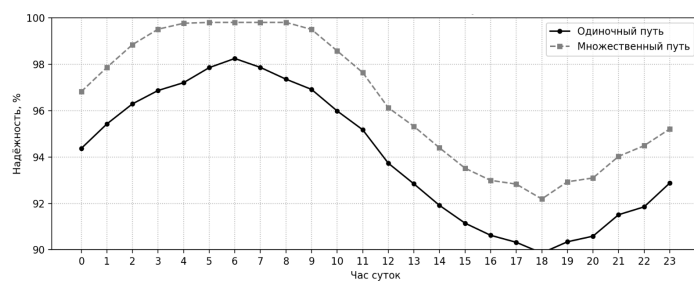


Рис. 2. Динамика надёжности в течение суток

Разработанная модель многопутевой маршрутизации в гибридной облачно-туманной сети продемонстрировала чёткие преимущества по сравнению с классическим однопутевым подходом. Во-первых, даже при двукратном копировании трафика дополнительная задержка осталась на приемлемом уровне, средний рост end-to-end латентности составил всего 3-4 мс (с 75 мс до 78 мс). При подключении третьего пути

задержка увеличилась до 80 мс, что также укладывается в рамки практических требований к реальному времени. Во-вторых, благодаря резервированию каналов надёжность доставки выросла с 98 до 99,5% при двух путях и до 99,8% при трёх путях.

Полученные результаты наглядно показывают «эффект убывающей отдачи». Первые добавленные пути приносят наиболее существенный выигрыш в надёжности, тогда как последующие дают всё меньший приращение и небольшое увеличение задержки. Тем не менее даже трёхпутевой вариант остаётся эффективным для критичных приложений, где потеря пакета недопустима.

Практическая значимость модели заключается в возможности гибко настраивать число резервных маршрутов и их топологию под разные сценарии от IoT-систем с мягкими требованиями к латентности до систем дополненной реальности и автономного управления, где задержка критична. Помимо повышения устойчивости к отказам, подход позволяет более равномерно распределять нагрузку между облачными и периферийными узлами, снижая пиковые заторы и упрощая масштабирование.

Предложенная смешанная целочисленная формулировка и её реализация в iFogSim доказали, что многопутевая маршрутизация в гибридных сетях – это практико-ориентированное решение для задач с высокими требованиями к надёжности и контролю задержки.

Рекомендации

Для внедрения предложенной модели многопутевой маршрутизации в реальных системах IoT и M2M следует прежде всего адаптировать список альтернативных путей под конкретную топологию сети и характер трафика, выбирая такие маршруты, которые обеспечивают максимальную разнообразность каналов по физическим ресурсам и операторам. Важно сохранить баланс между числом путей и доступными пропускными способностями, чтобы избыточное клонирование не приводило к перегрузке сети в часы пиковых нагрузок.

На практике стоит внедрять мультипутевую маршрутизацию поэтапно. Сначала протестировать схему с двумя путями на участках со стабильным трафиком и измерить реальную задержку и надёжность, затем при положительных результатах расширить число резервов до трёх и более. Одновременно рекомендуется интегрировать мониторинг параметров каналов (пропускной способности, фактической задержки, потерь) и использовать его данные для динамического перераспределения трафика. Если один из путей входит в перегрузку, модель автоматически уменьшает для него долю потоков.

Следующий шаг – объединить описанную задачу с алгоритмами машинного обучения, которые в реальном времени будут решать задачу выбора оптимального набора путей и долей трафика по ним, учитывая изменения условий сети и приоритеты приложений. Данный гибридный подход позволит сохранить высокую надёжность доставки (более 99,5%) и управляемую задержку (в пределах 80-90 мс) даже в условиях переменных нагрузок и отказов оборудования.

Результаты моделирования легко масштабируются на более сложные конфигурации. Если в исследуемой сети есть несколько облачных регионов и десятки fog-узлов, можно раз-

делить трафик на независимые группы и назначать для каждой группы собственные наборы путей. Данный метод позволит снизить латентность критичных запросов, повысить устойчивость сервисов и одновременно рационализировать расходы на каналы. Метод актуален для операторов и крупных предприятий, стремящихся к высокой надёжности при разумных затратах.

Дальнейшие исследования

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на нескольких взаимосвязанных направлениях, каждое из которых позволит углубить и расширить полученные результаты.

Во-первых, можно добавить в математическую модель динамику изменения пропускной способности и задержек каналов, чтобы учесть пиковые нагрузки или непредвиденные сбои; для этого целесообразно интегрировать повседневный мониторинг состояния сети и использовать предсказательные алгоритмы, которые заблаговременно перенастраивают набор активных путей.

Во-вторых, можно расширить оптимизационную задачу, включив в неё энергопотребление fog-узлов. Благодаря этому можно будет одновременно учитывать затраты на передачу и на вычисления, а также это повысит экологическую устойчивость решений.

В третьем направлении будет полезно исследовать использование гибридных алгоритмов, сочетающих точное смешанное целочисленное программирование с методами машинного обучения, чтобы получать качественные решения в условиях большого масштаба сети и жёстких временных ограничений.

Четвёртым шагом можно будет провести эксперименты в аппаратно-программных полигонах с реальным оборудованием fog-уровня и «облачными» сервисами, чтобы подтвердить адекватность полученных в iFogSim результатов и выявить практические особенности внедрения.

Наконец, дальнейшие работы могут развивать идею адаптивного мультипутевого маршрутизатора, который в режиме реального времени анализирует метрики качества обслуживания и сам перепрограммирует сетевые устройства SDN-контроллерами или API облачных платформ, обеспечивая оптимальный баланс между надёжностью, задержками и затратами в постоянно меняющейся среде.

Заключение

Разработанная модель многопутевой маршрутизации в гибридной облачно-туманной сети показала высокую эффективность благодаря возможностям клонирования трафика по нескольким независимым маршрутам. По результатам имитации в iFogSim при переходе от однопутевой схемы к двум одновременно задействованным путям средняя end-to-end задержка увеличилась всего на 4% (с 75 мс до 78 мс), в то время как надёжность доставки выросла сразу на 1,5 процента – с 98 до 99,5%. Добавление третьего пути добавило ещё лишь 2 мс к задержке (до 80 мс, или +6,7% от исходного значения), но надёжность приблизилась к 99,8%, что свидетельствует об отрицательной отдаче последнего резервирования с точки зрения прироста надёжности, однако остаётся оправданным для самых критичных сервисов.

В практических IoT-системах результат может быть применён для обеспечения стабильной доставки телеметрии и команд в «умных» городах, промышленных установках или автономном транспорте, где потеря даже одного пакета недопустима, но задержка должна оставаться в границах допустимых значений. Кроме того, подход позволяет гибко балансировать нагрузку между периферийным «fog» и облачным уровнем, уменьшая пиковые заторы и улучшая масштабируемость сетевой инфраструктуры при сохранении заданных QoS-параметров.

Литература

1. Черепенин В. А., Воробьев С. П., Синявцев В. В. Отличия и перспективы развития технологий облачных, туманных и граничных вычислений // Инженерный вестник Дона. 2023. № 11(107). С. 47-56.
2. Довгаль В. А., Довгаль Д. В. Роль туманных вычислений в интернете вещей // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2018. № 4(231). С. 205-209.
3. Глушак Е.В., Клюев Д.С., Воловач В.И. Анализ распределения задач в системе облачных и туманных вычислений // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №7. С. 25-33.
4. Yermakov S. G., Khalil M. M., Khomonenko A. D., Bukharova K. A. Evaluating the efficiency of fog computing on the internet of things using a Non-Markov model // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Vol. 16, No. 12, pp. 46-52.
5. Forrest W. The Impact of Cloud Computing on Data Centers // McKinsey Quarterly. 2023. № 2. С. 25-32.
6. Глушак Е.В., Клюев Д.С. Разработка и исследование моделей функционирования облачных и туманных вычислений // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 3. С. 157-168.
7. Глушак Е. В. Разработка и исследование имитационных моделей облачных и туманных вычислений в программе Fogtorch // Радиотехника. 2025. Т. 89, № 8. С. 96-104.
8. Глушак Е.В. Облачные и туманные вычисления: архитектура, моделирование, применение: монография. Вологда; Москва: ООО «Инфра-Инженерия», 2025. 180 с.
9. Глушак Е.В., Михайлова П.Д. Обзор адаптивных алгоритмов распределения потоков данных Интернета вещей в облачных и туманных средах // Инфокоммуникационные технологии. 2024. Т. 22, № 4(88). С. 15-22.
10. Мурашкин И.Н. Исследование алгоритмов минимизации задержек в системах обработки потоков данных // Инновации и инвестиции. 2025. № 4. С. 356-359.
11. Сухов А.М., Романов А.Ю., Глушак Е.В. Маршрутизация в циркулянтных графах на основе виртуальной координатной системы // Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2023. Т. 165, № 3. С. 282-293.
12. Голубятников А.О. Гибридные облачные архитектуры: оптимизация производительности и безопасности в мультиоблачных средах // Научный аспект. 2024. Т. 27, № 3. С. 3427-3431.
13. Дараселия А.В. Модели и анализ показателей эффективности механизмов выгрузки трафика в гетерогенных беспроводных сетях // дис. канд. ф.-м. наук по специальности 1.2.3 – Теоретическая информатика, кибернетика. Москва. 2022. 106 с.
14. Jain M, Dovrolis C. End-to-End available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003,11 (4), pp. 537-549.
15. Волков А.Н. Разработка и исследование комплекса моделей и методов построения сетей связи на основе туманных вычислений и предоставления услуг телеприсутствия - 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций... автореферат дисс. доктора техн. наук. Санкт-Петербург. 2024. 54 с.
16. Fletcher M., Paulz E., Ridge D., Michaels A.J. Low-Latency Wireless Network Extension for Industrial Internet of Things // Sensors 2024, 24, 2113. 16 p.
17. Куприянов Д. О. Математическое моделирование потока заявок к облачному вычислительному кластеру // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 10. С. 39-44.
18. Arora U., Singh N. IoT application modules placement in heterogeneous fog-cloud infrastructure // International Journal of Information Technology (Singapore). 2021. Vol. 13, No. 5, pp. 1975-1982.
19. Голышко А. IoT в облаках, за туманом и на границе // CONNECT № 9-10, 2024. С. 110-113.
20. Волков А.Н. Задача маршрутизации в сети динамических туманных вычислений // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 27-37.
21. Теория автоматического управления / Под ред. В.Б. Яковлева. М: Высшая школа, 2009. 568 с.

MODELING MULTIPATH ROUTING IN HYBRID COMMUNICATION NETWORKS USING CLOUD AND FOG COMPUTING

Elena V. Glushak, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, evglushak@yandex.ru

Dmitry S. Klyuev, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russia, klyuevd@yandex.ru

Vladimir I. Volovach, Povolzhskiy State University of Service, Tolyatti, Russia, volovach.vi@mail.ru

Abstract

This article develops a mathematical model of multipath routing in hybrid communication networks combining cloud and fog computing resources, and presents its implementation in the iFogSim environment to test the hypothesis that cloning traffic along several independent paths can significantly increase the reliability of data delivery with a moderate increase in end-to-end latency and efficient load distribution between levels. In the work, a mixed integer formulation of the optimization problem was obtained, in which streams from sensors are sent simultaneously along two or more routes, taking into account the bandwidth of the channels, a prototype was implemented in iFogSim, where, when each packet is generated, its clones are formed, sent along predefined paths through various fog nodes and a cloud center with independent consideration of losses and delays. Experiments have been conducted for circuits with one, two, and three paths, showing an increase in reliability from 98% to 99.5% and 99.8% even with increased delays. The proposed approach allows for real-world IoT- and M2M systems dramatically reduce the likelihood of critical data loss to fractions of a percent without exceeding the allowable delays for real-time applications, provides a tool for dynamically redistributing the load between the cloud and peripherals, can be quickly adapted to specific customer requirements in iFogSim or integrated into real networks using online algorithms, and also serves as a basis for further research in the field of transmission accounting, energy consumption of fog nodes and the application of machine learning methods for adaptive route management.

Keywords: fog computing, cloud computing, multipath routing, hybrid networks, transmission reliability, end-to-end latency, M/M/1 model, iFogSim modeling, mixed integer programming

References

- [1] V. A. Cherepenin, S. P. Vorobyov, V. V. Sinyavtsev, "Differences and prospects for the development of cloud, fog and edge computing technologies," *Engineering Bulletin of the Don*. 2023. No. 11(107), pp. 47-56.
- [2] V. A. Dovgal, D. V. Dovgal, "The role of fog computing in the Internet of Things," *Bulletin of the Adygea State University. Series 4: Natural, mathematical and technical sciences*. 2018. No. 4(231), pp. 205-209.
- [3] E.V. Glushak, D.S. Klyuev, V.I. Volovach, "Analysis of the distribution of tasks in the cloud and fog computing system," *T-Comm*. 2025. Vol. 19. No. 7, pp. 25-33.
- [4] A. Khiat, M. Haddadi, N. Bannes, "Genetic-Based Algorithm for Task Scheduling in Fog-Cloud Environment," *Journal of Network and Systems Management*. 2024. Vol. 32, No. 1. P. 3.
- [5] W. Forrest, "The Impact of Cloud Computing on Data Centers," *McKinsey Quarterly*. 2023. No. 2, pp. 25 - 32.
- [6] E.V. Glushak, D.S. Klyuev, "Development and research of models of functioning of cloud and fog computing," *Radio Engineering*. 2025. Vol. 89, No. 3, pp. 157-168.
- [7] E. V. Glushak, "Development and research of simulation models of cloud and fog computing in the Fogtorch program," *Radio Engineering*. 2025. Vol. 89, No. 8, pp. 96-104.
- [8] E. V. Glushak, "Cloud and fog computing: architecture, modeling, application" monograph . Vologda; Moscow: Infra-Engineering LLC, 2025, 180 p.
- [9] E. V. Glushak, P. D. Mikhailova, "Review of adaptive algorithms for distributing Internet of Things data flows in cloud and foggy environments," *Infocommunication technologies*. 2024. Vol. 22, No. 4(88), pp. 15-22.
- [10] I. N. Murashkin, "Investigation of algorithms for minimizing delays in data flow processing systems," *Innovations and investments*. 2025. No. 4, pp. 356-359.
- [11] A.M. Sukhov, A.Yu. Romanov, E.V. Glushak, "Routing in circulant graphs based on a virtual coordinate system," *Scientific Notes of Kazan University. Series: Physical and mathematical sciences*. 2023. Vol. 165, No. 3, pp. 282-293.
- [12] A.O. Golubyatnikov, "Hybrid cloud architectures: optimizing performance and security in multi-cloud environments," *Scientific aspect*. 2024. Vol. 27, No. 3, pp. 3427-3431.
- [13] A.V. Daraselia, "Models and analysis of performance indicators of traffic unloading mechanisms in heterogeneous wireless networks," PhD candidate of Philological Sciences, specialty 1.2.3 - Theoretical computer Science, cybernetics. Moscow. 2022. 106 p.
- [14] M. Jain, C. Dovrolis, "End-to-End available bandwidth: Measurement methodology, dynamics, and relation with TCP throughput [J]," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, no. 11 (4), pp. 537-549.
- [15] A.N. Volkov, "Development and research of a set of models and methods for building communication networks based on cloud computing and telepresence services," - 2.2.15. Telecommunications systems, networks and devices ... abstract of the dissertation. Doctors of Technical Sciences. Saint Petersburg. 2024. - 54 p.
- [16] M. Fletcher, E. Paulz, D. Ridge, A. Michaels, "Low-Latency Wireless Network Extension for Industrial Internet of Things," *Sensors*, 2024, 24, 2113, 16 p.
- [17] D.O. Kupriyanov, "Mathematical modeling of the flow of applications to a cloud computing cluster," *T-Comm*. 2020. Vol. 14, No. 10, pp. 39-44.
- [18] U. Arora, N. Singh, "IoT application modules placement in heterogeneous fog-cloud infrastructure," *International Journal of Information Technology (Singapore)*. 2021. Vol. 13, No. 5, pp. 1975-1982.
- [19] A. Golyshko, "IoT in the clouds, beyond the fog and on the border," *CONNECT*. No. 9-10, 2024, pp. 110-113.
- [20] A.N. Volkov, "The routing problem in a network of dynamic fog computing," *Proceedings of educational institutions of communications*. 2024. Vol. 10. No. 4, pp. 27-37.
- [21] "Theory of automatic control" Edited by V.B. Yakovlev. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2009. 568 p.

Information about authors:

Elena V. Glushak, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Associate Professor, PhD, Associate Professor of the Department of Networks and Communication Systems, Samara, Russia, ORCID 0009-0000-5494-9746

Dmitry S. Klyuev, Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics, Professor, Ph.D., Head of the Department of Radioelectronic Systems, Samara, Russia, ORCID 0000-0002-9125-7076

Vladimir I. Volovach, Povolzhskiy State University of Service, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Acting Director of the Higher School of Advanced Production Technologies, Tolyatti, Russia, ORCID 0000-0002-0201-2545