

УДК 621.391

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-29-51>

EDN: RDQBHH

Услуги телеприсутствия и их будущее в развивающейся среде туманных вычислений: обзор исследований и примеров использования

Данг В. Т. , Волков А. Н.

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

Постановка задачи. Исследование направлено на анализ технологий туманных вычислений и их интеграции в будущие сети 6G для поддержки услуг телеприсутствия. Главная задача – выявить основные тенденции, направления и проблемы развития технологий телеприсутствия, включая нестабильность сети и безопасность данных. Целью работы является проведение обзора исследований телеприсутствия и изучение применения туманных вычислений для его поддержки в сетях 5G и 6G. **Используемые методы:** анализ более 700 публикаций из базы данных IEEE Xplore по темам исследований, посвященных телеприсутствию и туманным вычислениям; обзор современных технологий и подходов в области туманных вычислений; критический анализ существующих моделей туманных вычислений, включая иерархическую и многоуровневую архитектуры; статистический анализ для выявления основных тенденций и направлений исследований. **Новизна работы** заключается в проведении статистического анализа текущих исследований по телеприсутствию, выполненного в таком объеме впервые. Проанализированы ограничения существующих моделей туманных вычислений, предложены пути их преодоления для эффективного применения в сетях 6G. Особое внимание уделено важности интеграции туманных вычислений для решения проблем задержки и нестабильности сети в услугах телеприсутствия. **Результаты работы** включают выявление ключевых направлений исследований в области телеприсутствия, таких как разработка роботов для медицины, образования и других сфер, где они могут заменить человека, улучшая эффективность и доступность услуг. Обоснована перспектива применения туманных вычислений для поддержки приложений телеприсутствия в реальном времени, что позволяет существенно снизить задержки и повысить стабильность сети. Подчеркнута необходимость совершенствования архитектур туманных вычислений с целью обеспечения высокой надежности, масштабируемости и минимизации задержек в сетях 5G и 6G. **Теоретическая значимость:** работа имеет теоретическую ценность, поскольку создает основу для дальнейших исследований в области телеприсутствия и туманных вычислений, а также расширяет понимание их применения для решения проблем задержек и нестабильности сети. **Практическая значимость** заключается в возможности использования результатов для разработки более эффективных архитектур сетей 6G и внедрения инновационных решений в телеприсутствии, что повысит качество связи, снизит задержки и улучшит взаимодействие в удаленных средах.

Ключевые слова: сети 6G, туманные вычисления, облачные вычисления, телеприсутствие, мобильная связь, сети следующего поколения

Библиографическая ссылка на статью:

Данг В. Т., Волков А. Н. Услуги телеприсутствия и их будущее в развивающейся среде туманных вычислений: обзор исследований и примеров использования // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 3. С. 29–51. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-29-51. EDN: RDQBHH

Reference for citation:

Dang V. Th., Volkov A. Telepresence Services and Their Future in the Evolving Fog Computing Environment: A Review of Research and Use Cases. *Telecom IT*. 2024. Vol. 12. Iss. 3. PP. 29–51 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-3-29-51. EDN: RDQBHH

Введение

В условиях стремительного развития цифровых технологий и сетей связи нового поколения (IMT-2030 / 6G) технологии телеприсутствия и туманных вычислений приобретают все большее значение. Сети 6G, внедрение которых ожидается к 2030 г. [1], обещают обеспечить малую задержку (до 1 мс), высокую пропускную способность и поддержку огромного числа устройств Интернета вещей (IoT, *аббр. от англ.* Internet of Things) [2]. Это делает их ключевыми для приложений, требующих передачи данных в реальном времени, таких как: телеприсутствие, виртуальная реальность (VR, *аббр. от англ.* Virtual Reality) и дополненная реальность (AR, *аббр. от англ.* Augmented Reality).

Услуги телеприсутствия расширяют возможности пользователя, позволяя взаимодействовать с удаленными людьми или устройствами, создавая ощущение их физического присутствия. Примерами применения таких услуг являются дистанционные операции в медицине, удаленное обучение и участие в виртуальных совещаниях, а также взаимодействие с роботами на производстве. Однако современные технологии услуг, основанные на централизованных облачных вычислениях, имеют ограничения, связанные с задержками (в первую очередь, с задержкой распространения), перегрузкой центральных серверов и низкой энергоэффективностью. Эти проблемы особенно актуальны в условиях увеличивающегося мобильного трафика и растущей плотности устройств, которая к 2030 г. может достигать 1 млн устройств на 1 км³. В этом контексте технология туманных вычислений предоставляет новые возможности и позволяет перераспределить вычислительные ресурсы ближе к конечным пользователям, снижая задержку и повышая надежность систем. Туманные вычисления могут стать ключевым компонентом архитектуры сетей 6G, обеспечивая обработку данных ближе к пользователям, при этом поддерживая ресурсоемкие приложения, такие как 3D-видео, голографический тип коммуникации (HTC, *аббр. от англ.* Holographic Type Communications). Тактильный интернет и интеграцию цифровых и физических аватаров в виртуальные среды.

Хотя применение туманных вычислений в услугах телеприсутствия обладает огромным потенциалом, количество и разнообразие исследований в этой области все еще невелики. Это подчеркивает необходимость дальнейших изысканий и разработки архитектур, которые смогут интегрировать возможности сетей 6G с туманными вычислениями для создания масштабируемых и энергоэффективных решений. С учетом стремительного увеличения мобильного трафика и запросов на более высокий уровень иммерсивности такие исследования являются не только актуальными, но и необходимыми для реализации инновационных приложений и улучшения качества жизни.

Сеть 6G, как ожидается, значительно превзойдет 5G благодаря использованию более высоких частотных диапазонов, что позволит передавать данные быстрее и с большей емкостью. Это особенно важно для приложений с высокой пропускной способностью, таких как потоковое воспроизведение видео в формате 8K, VR, AR и HTC. Благодаря значительно уменьшенной задержке сеть 6G будет более подходящей для приложений, требующих синхронизации данных

в реальном времени, таких как автономное вождение и облачные вычисления. Кроме того, для повышения своей эффективности и надежности сеть 6G будет включать передовые технологии: искусственный интеллект (AI, *аббр. от англ. Artificial Intelligence*) и машинное обучение (ML, *аббр. от англ. Machine Learning*). В целом ожидается, что сеть 6G станет революционным достижением в мобильных технологиях с потенциалом преобразовать наше взаимодействие с миром.

Исследователи усердно работают над тем, чтобы сеть 6G превосходила возможности предыдущих поколений, соответствуя будущим требованиям качества обслуживания [3]. Как и предыдущие поколения, 6G будет иметь уникальные характеристики применения и технологические тенденции, которые определят новые требования к производительности и значительно изменят стандарт обслуживания сети 5G, и в тоже время в своем развертывании 6G столкнется со множеством новых вызовов. Одной из главных проблем, на которую исследователи указывают с момента появления сети 5G, является разработка коммерческих приемопередатчиков, работающих на частотах THz. В этом контексте формирование будущей сети 6G, основные услуги, которые она предоставит, и ее ключевые технологии являются в последнее время активно изучаемыми темами.

В данной статье представлен обзор исследований сетей 6G, охватывающий ее будущие направления и спектр услуг. Исследование основано на всестороннем обзоре основных библиографических баз данных, таких как Science Direct, IEEE Xplore и Google Scholar, а также на отборе и анализе информации из авторитетных научных публикаций. В работе использован набор данных недавно опубликованных статей, охватывающих период быстрого развития технологии 6G. Исследование сосредоточено на трех основных областях: будущем развитии и формировании сети 6G, услугах, которые она поддерживает (включая телеприсутствие и туманные вычисления), и их недавнем развитии. Кроме того, в статье представлен обзор услуг, которые технология 6G стремится предложить пользователям. В частности, уделяется внимание услугам телеприсутствия, которые представляют значительный интерес для исследователей и имеют потенциал для широкого применения в различных областях.

Развитие сети 6G и основные направления услуг в будущем

Сети 5G / IMT-2020 активно развиваются для поддержки приложений с низкой задержкой, таких как управление беспилотными аппаратами и Тactильный интернет. Однако стремительное развитие технологий, основанных на автономизации и обработке больших данных, может превзойти возможности, предоставляемые новыми сетями и услугами 5G. В настоящее время научные исследования и разработки направлены на создание интеллектуальных цифровых технологий и интегрированных сетей 6G / IMT-2030, что приближает нас к смешанной реальности, включая следующую эру сетей и услуг – метавселенные [4]. Краткий обзор истории развития беспроводных сетей связи, включая направление 6G / IMT-2030, представлен на рисунке 1.

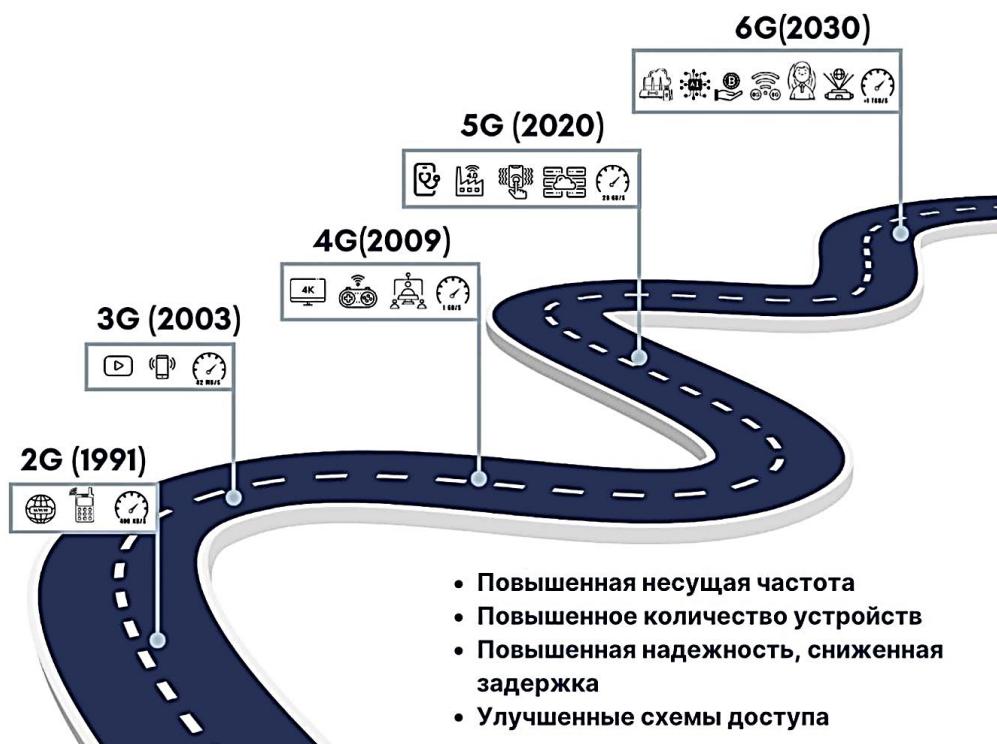


Рис. 1. Схематическая история беспроводных сетей связи

Актуальными проблемами для исследователей являются передача данных со скоростью до 1 Тбит/с на одного пользователя, а также работа в sub-THz и THz-диапазоне. Другой важной проблемой будет использование и внедрение интеллектуальных технологий, разнородных источников данных, AI и услуг телеприсутствия. Это ставит перед исследователями и разработчиками множество технических и математических проблем. Продвижение сетей связи является одним из ключевых факторов развития современного информационного общества: они обеспечивают связь между людьми, устройствами и системами для общения, работы и получения доступа к информации. Каждое новое поколение сетей связи имеет свои возможности и преимущества. Сети 5G, которые сейчас находятся в стадии внедрения, уже обеспечивают значительно более высокую скорость передачи данных, чем предыдущие поколения. Фундаментальные изменения в развитии сетей 6G будут связаны с несколькими ключевыми направлениями.

Сети с ультрамалыми задержками. Новые технологии привели к еще более значительным изменениям в построении сетей связи, поскольку они требуют передачи данных с задержкой в 1 мс, что в настоящее время в 100 раз меньше, чем в существующих сетях связи. При этом стоит отметить, что концепция сети 6G приводит к такому процессу, как децентрализация сетей связи, поскольку фундаментальные ограничения на скорость передачи света являются непреодолимыми [5].

Сверхплотные сети. Сверхплотные сети являются одной из ключевых характеристик сетей 6G. Поскольку по прогнозам к 2030 г. на 1 км³ пространства будет приходиться около 1 млн подключенных устройств, в том числе IoT, сети связи должны поддерживать огромное количество соединений с низкой задерж-

кой и высокой пропускной способностью. Существует несколько способов достижения сверхплотных сетей. Один из них – осваивание новых частотных диапазонов. Сеть связи на миллиметровых волнах, использующая частоты от 30 до 300 ГГц, представляет собой более эффективную альтернативу. Также AI и ML призваны оптимизировать распределение ресурсов [6].

Интернет навыков (Internet of Skills). Эта концепция предполагает передачу данных для обучения людей и роботов новым умениям в реальном времени. Например, возможно дистанционно обучать языкам, управлять оборудованием или проводить медицинские операции и реабилитацию. Роботы могут учиться выполнять такие задачи, как ремонт техники, благодаря сетям с ультрамалой задержкой [7].

Интеграция воздушных и наземных сегментов. Объединяя воздушные и наземные сегменты, сети 6G обеспечат связь в труднодоступных зонах, низкие задержки благодаря близости к пользователям, а также новые возможности, например, мониторинг инфраструктуры и связь в чрезвычайных ситуациях. Они являются частью концепции Космическо-наземной интегрированной сети (STIN, *аббр. от англ. Space-Terrestrial Integrated Network*), утвержденной Международным союзом электросвязи (ITU-T) [8].

Беспилотный транспорт. Сети, объединяющие беспилотные автомобили с придорожными вычислительными системами, позволяют получать данные о состоянии дорог и потенциальных угрозах, повышая безопасность и эффективность движения. Это также способствует оптимизации трафика и улучшению обслуживания пользователей [9].

С внедрением сети 6G наша жизнь значительно изменится. От промышленности до удаленных услуг, от здравоохранения до образования – во всех сферах прогнозируются большие изменения в ближайшем будущем. На рисунке 2 показаны основные направления развития услуг в сетях 6G.

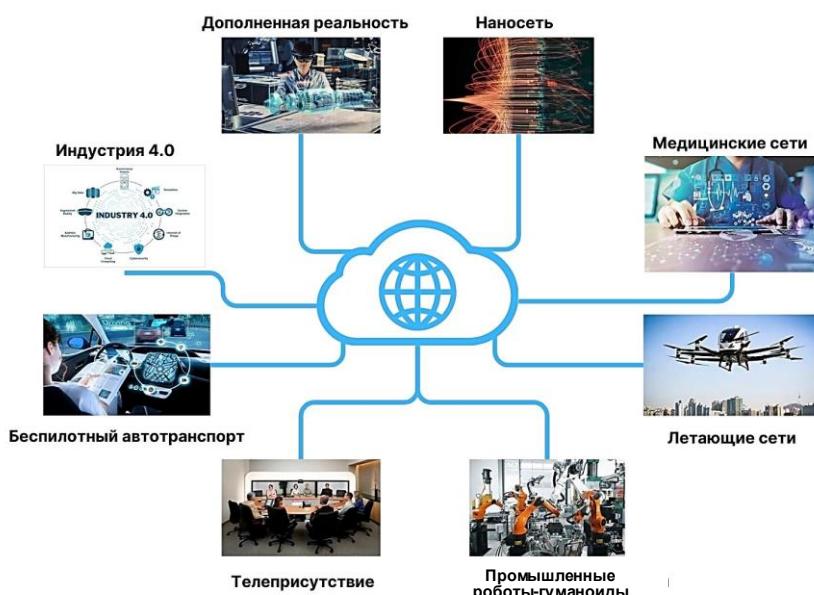


Рис. 2. Основные направления развития услуг в сетях 6G

Основные фундаментальные изменения в развитии сетей 6G

На основе анализа изменений в развитии сетей связи можно утверждать, что к 2030 г. они станут сверхплотными, с ультрамалыми задержками. Это позволит сократить цифровой разрыв между территориями, поскольку сеть будет децентрализована. Широкое распространение IoT и «умных» городов будет способствовать повсеместной возможности предоставления услуг сетей 2030. Кроме того, сети 6G приобретут ряд новых характеристик – они станут более энергоэффективными, надежными и безопасными.

Телеприсутствие. Персонализация сети. Телеприсутствие – это современная тенденция, которая способствует преодолению географических границ и позволяет людям взаимодействовать через электронные устройства на расстоянии, будь то видеозвонки, онлайн-конференции или управление аватарами. Сети 6G добавили в телеприсутствие новую концепцию НТС, которая повышает уровень иммерсивности взаимодействия между людьми и роботами. Будущие сети будут заполнены не только данными, но и виртуальными сущностями, способными думать и действовать независимо. Эти сущности, или аватары, позволят людям взаимодействовать с миром из любой точки. Чтобы аватары могли полноценно взаимодействовать с окружающим миром, необходимы сети с очень низкой задержкой. Только тогда человек, управляющий аватаром, сможет почувствовать себя на месте событий (продвинутый уровень погружения). В перспективе такие сети смогут поддерживать управление несколькими аватарами одновременно, что создаст новый тип трафика и взаимодействий [10].

Летающие сети. Для удовлетворения требований сетей связи 2030 г. рассматривается использование конвергенции наземных и спутниковых сетей, однако задержки в спутниковых системах (около 250 мс) ограничивают их применение для приложений, требующих ультрамалых задержек. Более реалистично будут использоваться беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и привязанные воздушные устройства, функционирующие на высотах в десятки или сотни метров. Они будут особенно полезны в труднодоступных районах с низкой плотностью населения [11, 12]. Низкоорбитальные спутники могут использоваться сетью для хранения и обработки данных, а активную вычислительную часть будут обеспечивать БПЛА. Это откроет новые возможности для приложений, таких как телеприсутствие, медицинские сети, AR и IoT [13].

Наносети. К 2030 г. ожидается развитие наносетей и нановещей, начало исследований которых началось еще в сетях IMT-2020 в рамках IoT. Такие технологии позволяют увеличить плотность сетей и внедрить решения в труднодоступные места, включая тело человека или внутренние конструкции зданий. Прогресс в спектроскопии уже делает возможным использование инфракрасных микроспектрометров, встроенных в смартфоны, что позволит проводить анализ продуктов или предметов в реальном времени [14, 15]. Дополнительно рассматривается использование феромонов для передачи информации, что открывает перспективы нового уровня взаимодействия между людьми и устройствами, включая управление дронами или создание виртуальных помощников [16].

Таким образом, к 2030 г. и далее сети связи будут иметь принципиально новую архитектуру и будут способны предоставлять большой спектр услуг с расширенными возможностями для пользователей.

Туманные вычисления – перспективное технологическое решение для сетей 6G / IMT-2030

До появления облачных вычислений предприятиям приходилось самостоятельно инвестировать в аппаратное и программное обеспечение для хранения и обработки данных, что создавало множество трудностей, связанных с масштабированием, энергопотреблением, затратами на обслуживание. Облачные вычисления стали закономерным результатом развития, который позволил решить некоторые из этих проблем. С их помощью предприятия могут арендовать услуги хранения и обработки данных у внешних поставщиков. Облачные центры обработки данных обычно доступны через Интернет, поскольку они подключены к ядру сети [17]. Удаленная обработка с помощью такого централизованного подхода к облаку была бы невозможна без развития проводных и беспроводных сетей передачи данных, особенно это касается скорости передачи данных [18]. В определенной степени облачные вычисления решили проблему высоких требований к хранению и вычислениям для многих приложений. Они имеют два основных преимущества: во-первых, позволяют экономить деньги за счет совместного использования ресурсов, а во-вторых, помогают ускорить инновации путем снижения затрат на развертывание и эксплуатацию приложений [19]. Это помогает сэкономить намного больше по сравнению с традиционным методом хранения и обработки данных, улучшает масштабируемость и снижает потребление энергии.

Однако у облачных вычислений есть и ограничения, такие как задержка и безопасность. Задержка представляет собой время, которое проходит между отправкой запроса и получением результата. В случае облачных вычислений запрос должен быть отправлен в удаленный центр обработки данных, что может привести к значительной задержке.

Туманные вычисления – это развивающаяся технология, имеющая потенциал для устранения некоторых недостатков облачных вычислений. Понимать их можно как модель, которая предоставляет средства вычисления, сети и хранения через распределенные сервера и устройства пользователей и IoT (со свободными ресурсами) на краю сети, рядом с конечными пользователями [18]. На краю сети все чаще появляются устройства хранения и вычисления, называемые туманными узлами, которые могут принадлежать конечным пользователям или операторам услуг и эксплуатироваться ими. OpenFog Consortium (объединение компаний, занятых стандартизацией и продвижением технологии туманных вычислений) считает, что любой узел – от встроенного процессора на плате умных устройств IoT или сервера, расположенного в региональном офисе телеком-провайдера, до серверов обработки, расположенных в местных офисах и/или клиентских помещениях, – может работать как туманный [20]. С появлением IoT количество подключенных устройств, как ожидается, будет

расти экспоненциально. По оценкам специалистов, к 2030 г. количество этих устройств составит от 25 до 50 млрд и создаст около 79,4 Збайт данных [21, 22].

Туманные узлы имеют большое преимущество перед центрами обработки данных, поскольку находятся ближе к конечным пользователям. Это означает, что облачные сервисы могут быть перенесены из ядра сети, что приводит к снижению задержки. Туманные узлы могут быть подключены к сети по проводным или беспроводным каналам, что позволяет развертывать их в различных местах, включая отдаленные и труднодоступные районы. Однако распределение облачных сервисов по туманным узлам – сложная задача, требующая учета множества факторов, в том числе задержки, энергоэффективности, масштабируемости и стоимости.

С учетом быстро растущего числа подключенных устройств коммерциализация сети 5G и исследование долгосрочного видения сети 6G неизбежны. В рамках сети 6G будет развернуто новое поколение приложений и услуг (например, VR, телеприсутствие и т. д.), а также будет разрешено подключение большого количества устройств [23, 24]. В связи с ожидаемым прогрессом сети 6G, включая порог задержки 1–0,1 мс (для ряда услуг) и улучшение энергоэффективности в 10 раз, исследование будущих архитектур туманных вычислений является перспективным, поскольку, если все данные с конечного устройства обрабатываются облаками непосредственно на краю сети, скорость и эффективность значительно возрастают [25].

Суть туманных вычислений заключается в расширении облачных вычислений, но с приближением к конечным устройствам. Туманные вычисления переносят услуги хранения, сети и вычислений ближе к пользователям, выступая в роли посредника между пользователями и центрами обработки данных (рисунок 3).

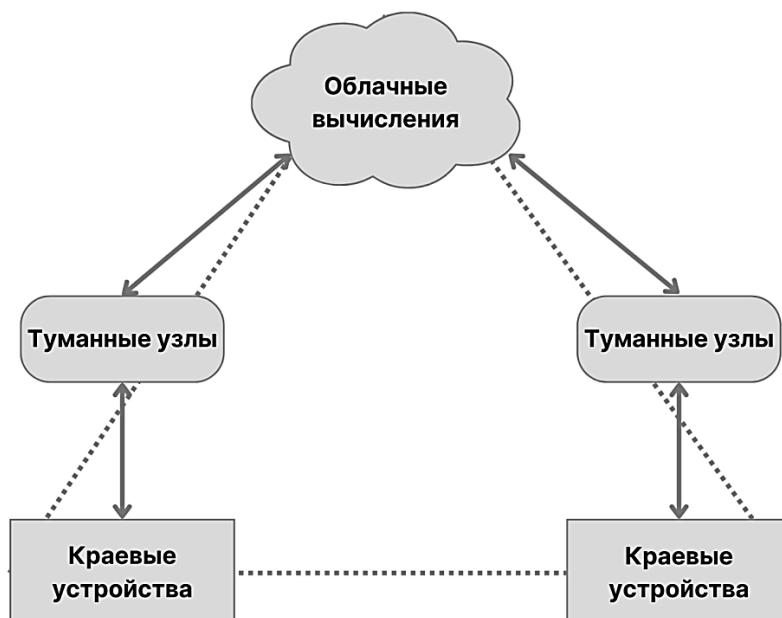


Рис. 3. Схема расширенной архитектуры облачных вычислений

Серверы, расположенные на краю сети, недалеко от пользователей, называются туманными узлами и могут быть размещены в любом месте, где есть сетевое подключение. Любой сервер, способный к вычислениям, сетевому подключению и хранению, может называться туманным узлом. Эти туманные узлы могут быть коммутаторами, серверами, камерами видеонаблюдения и маршрутизаторами [26]. Развитие фреймворка для туманных вычислений позволяет организациям обрабатывать данные непосредственно на границе сети, что снижает задержки и повышает общую производительность. Благодаря туманным вычислениям данные могут обрабатываться в любом месте, где это происходит наиболее эффективно, что может привести к снижению задержки и повышению производительности.

Туманные вычисления позволяют приблизиться к созданию сетей с ультрамалой задержкой между устройствами и точками анализа. Это достигается путем размещения вычислительных ресурсов ближе к месту создания данных. Такая архитектура снижает необходимость в передаче данных на большие расстояния, что приводит к снижению задержки и повышению производительности. Кроме того, туманные вычисления могут использоваться, когда отсутствует доступ к высокоскоростным сетям. В таких случаях данные могут обрабатываться локально, что может быть особенно важно для приложений, требующих быстрого реагирования. Авторы работы [27] утверждают, что туманные вычисления по сравнению с облачными обладают множеством новых и полезных функций, основные из которых представлены ниже.

Гибкость. Туманные вычисления обеспечивают распределенные ресурсы хранения и вычислений, которые могут работать с широким спектром конечных устройств, таких как сетевые датчики, промышленные машины и носимые устройства. Это делает облако тумана подходящим для различных приложений IoT – от мониторинга окружающей среды до управления производством.

Связь в реальном времени. Туманные вычисления обеспечивают одновременную связь между туманными узлами, что необходимо для приложений IoT, требующих упреждающего реагирования, таких как мониторинг безопасности и управление дорожным движением.

Физическое распределение. В отличие от облачных, туманные вычисления распределяют приложения и услуги. Это означает, что они могут храниться в любом месте, благодаря чему снижается задержка и улучшается производительность для приложений IoT.

Малая задержка и местоположение. Туманные вычисления производятся рядом с конечными устройствами, что обеспечивает минимальное время ожидания при обработке информации с последних.

Совместимость. Модули туманных вычислений могут адаптироваться и взаимодействовать с различными платформами через различных поставщиков услуг.

Обеспечение веб-анализа и интеграции с облаком. Туманные вычисления находятся между конечными устройствами и облаком, играя важную роль в обработке и вычисление информации рядом с конечными устройствами.

Неоднородность. Узлы и конечные устройства туманных вычислений создаются разными производителями с собственными архитектурными решениями.

ми и размещаются в соответствии с требованиями регионального законодательства и стандартизационных норм. Такой подход обеспечивает гибкость и совместимость туманных вычислений на разнообразных аппаратных и программных платформах.

Обеспечение гибкости. Одним из важных требований туманных вычислений является возможность прямого подключения к мобильным устройствам, которая позволяет использовать гибкие технологии, такие как протокол разделения местоположения / идентификатора, требующий распределенной системы индексирования.

Структура туманных вычислений

Туманные вычисления – это многообещающая парадигма, которая переносит некоторые вычислительные операции из централизованных data-центров на край сети, революционизируя традиционную обработку данных. Благодаря более близкому размещению вычислительных ресурсов к источнику данных этот метод снижает задержку, повышает эффективность использования пропускной способности и улучшает общую отзывчивость системы. Туманные вычисления позволяют легко интегрировать IoT-устройства, анализировать данные в реальном времени и принимать более быстрые решения, используя устройства на краю сети. Помимо снятия нагрузки с центральных центров данных, эта распределенная вычислительная парадигма открывает новые возможности для передовых приложений в различных отраслях, таких как здравоохранение, промышленная автоматизация, умные города и беспилотные автомобили. В основном архитектура туманных вычислений реализуется в соответствии с двумя основными моделями: иерархической и многоуровневой.

В иерархической архитектуре туманные вычисления играют роль посредника, располагающегося между конечным и удаленным слоями облачных вычислений для обеспечения непрерывности предоставления услуг вдоль пути «устройство – туман – облако». Этот контекст иерархической модели архитектуры туманных вычислений проиллюстрирован на рисунке 4.

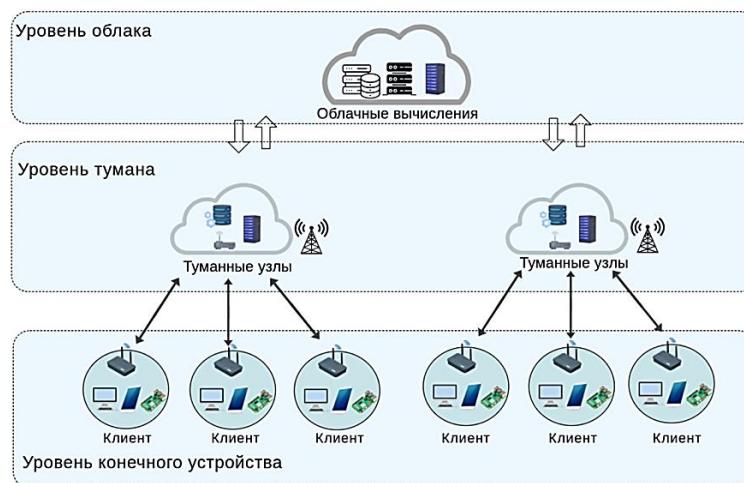


Рис. 4. Модель иерархической архитектуры туманных вычислений

При анализе предложенной компанией Cisco модели туманных вычислений [28] выявляется несколько проблем. Во-первых, в ней отсутствует четкое определение туманных узлов, что делает неясным их расположение – на базовых станциях мобильных сетей, в центрах обработки данных или в других местах. Во-вторых, вычислительные возможности и объемы хранения данных этих узлов не определены, что затрудняет оценку эффективности и масштабируемости модели. В модели не указано, кто будет отвечать за развертывание и управление туманными узлами. Кроме того, модель туманных вычислений Cisco имеет ряд других ограничений. Анализ данных в туманных узлах может привести к увеличению задержек по сравнению с анализом в центрах обработки данных. Хранение данных в туманных узлах повышает риск кибератак, а управление большой сетью туманных узлов может быть сложным. Из-за этих ограничений модель туманных вычислений Cisco не получила широкого распространения, тем не менее она обладает потенциалом для решения проблем задержки и пропускной способности в приложениях IoT.

Чтобы устранить ограничения модели туманных вычислений Cisco, в ряде исследований были предложены многоуровневые модели туманных вычислений. В таких моделях туманные узлы разделяются на различные уровни в зависимости от функциональности и возможностей. В данной работе предлагается четырехуровневая модель туманных вычислений для развертывания IoT- и других приложений в сети 6G. Она позволяет снизить задержки для IoT-приложений, повысить эффективность использования ресурсов, масштабируемость и безопасность. Модель проста в развертывании и управлении (рисунок 5).

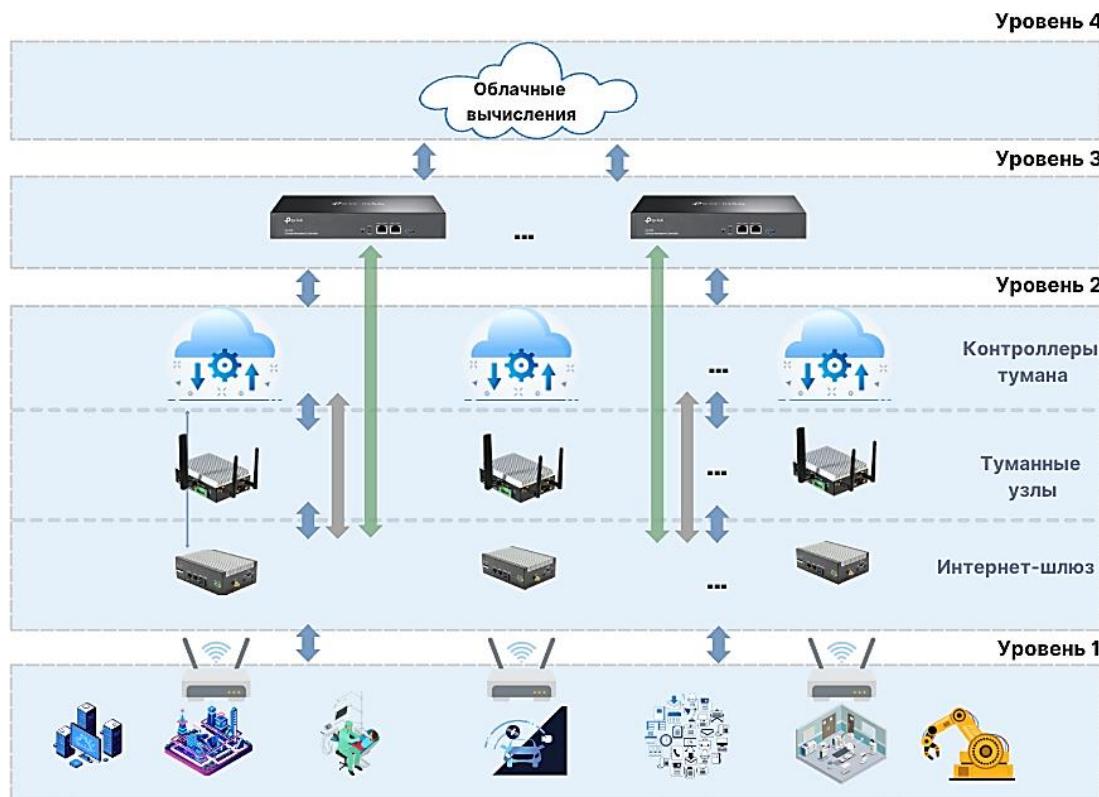


Рис. 5. Четырехуровневая архитектура туманных вычислений

Устройства на двух соседних уровнях взаимодействуют друг с другом с помощью проводных или беспроводных соединений. Каждое устройство поддерживает несколько виртуальных машин в рамках имеющихся ресурсов. Облачо, контроллер тумана и туманный узел имеют по несколько виртуальных машин для удовлетворения вычислительных потребностей различных приложений.

Исследователи активно разрабатывают новые сетевые архитектуры, чтобы уточнить значительные изменения, вызванные интегрированной сетью 6G «земля – вода – воздух – космос», которая преодолевает традиционные границы и вводит людей в новую эру общения и взаимодействия. В данной статье предлагается интегрированная архитектура, основанная на распределенных границах и туманных вычислениях, с использованием AI и распределенных пограничных вычислений для достижения бесперебойной связи, непрерывного покрытия и эффективного распределения ресурсов (рисунок 6).

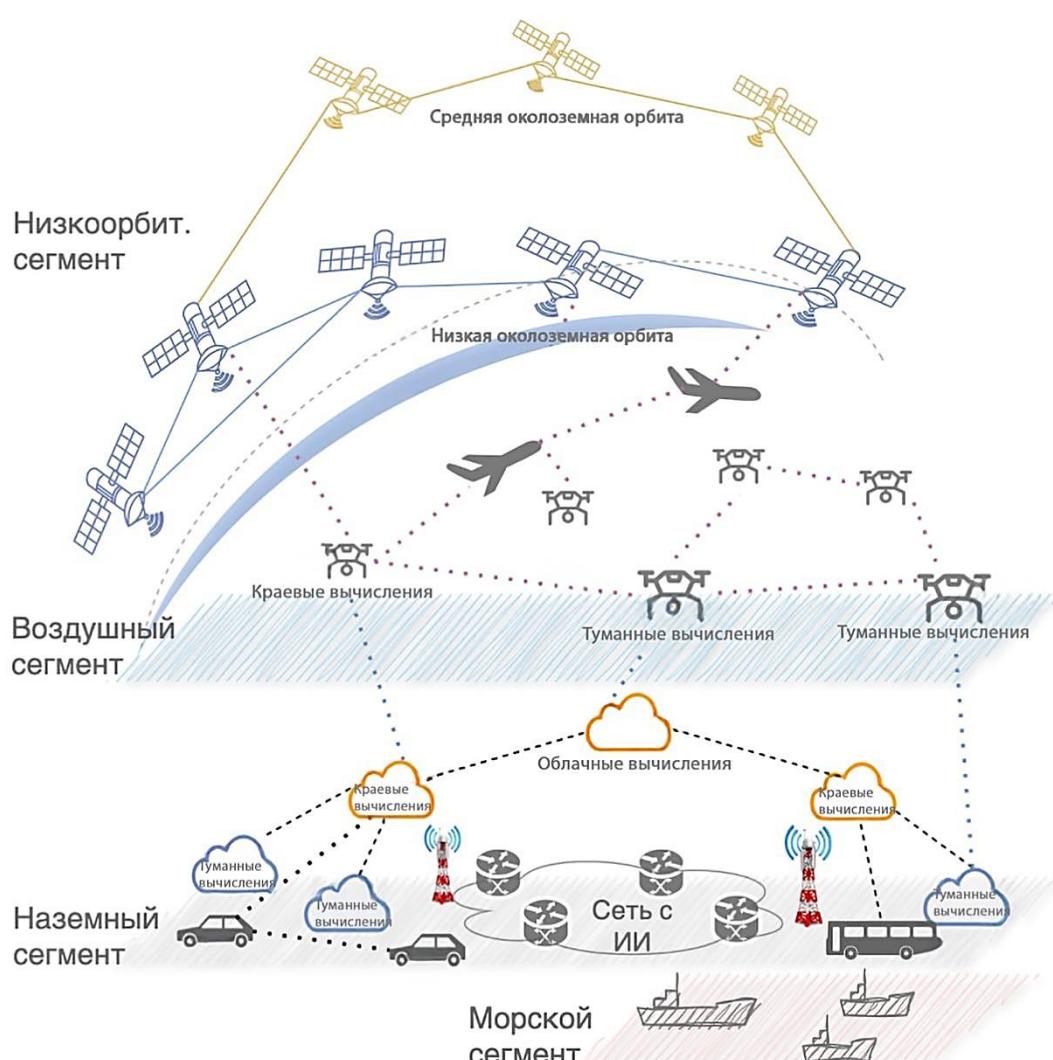


Рис. 6. Интегрированная архитектура сети 6G с использованием распределенных пограничных и туманных вычислений

Туманные вычисления – это парадигма, которая получает все большее признание и распространение благодаря своему вкладу в современные

вычислительные технологии. Она открывает потенциальные выгоды и возможности применения, однако для ее успешного внедрения необходимо решить проблемы, связанные с безопасностью, стандартизацией и управлением. При соответствующих инвестициях и развитии туманные вычисления могут сыграть решающую роль в создании более умных, безопасных и эффективных сетей в будущем.

Анализ развития сервисов телеприсутствия

В настоящее время технология телеприсутствия стала перспективным направлением исследований с широким спектром приложений в промышленности, образовании и коммерции. В этом разделе статьи рассматриваются достижения и вызовы, стоящие перед этой областью, а также анализируются общие тенденции развития технологии телеприсутствия – от улучшения качества изображения и звука до внедрения визуальных интерфейсов и роботов, заменяющих людей в удаленных операциях; исследуются возможности применения туманных вычислений в услугах, предоставляемых сетями нового поколения, включая их применение в услугах телеприсутствия.

Технология телеприсутствия обладает потенциалом революционизировать коммуникации и взаимодействие пользователей в будущем. Она позволяет проводить виртуальные встречи в реальном времени с коллегами или друзьями из любой точки мира, будто бы они находятся в одном месте. Технология телеприсутствия возможна благодаря комбинации аппаратного и программного обеспечения, которые позволяют передавать аудио- и видеоматериалы высокого качества по сети. Прогресс в области современных коммуникаций позволил широко внедрить технологию телеприсутствия, которая стала использоваться в качестве альтернативы перемещению на большие расстояния для участия в конференциях или встречах. Технология телеприсутствия может помочь сэкономить время и деньги, снизить экологический ущерб, а также позволяет людям удаленно контролировать различные технологические процессы и управлять ими.

Кроме того, телеприсутствие может улучшить качество жизни, предоставляя услуги поддержки образования и здравоохранения в отдаленных и сельских районах, где доступ к современным технологиям ограничен. В контексте автоматизированных систем телеприсутствие может предоставить операторам и пользователям различных приложений возможность предоставлять или получать аналогичные услуги без физических ограничений, снижающих качество соответствующих услуг.

В последние годы развитие науки и технологий привело к значительным достижениям в области телеприсутствия. Это стало возможным благодаря улучшению качества видеоизображений и передачи звука, разработке интуитивно понятного пользовательского интерфейса. Прогресс в области камер высокого разрешения и улучшенных алгоритмов сжатия позволил передавать видеофайлы лучшего качества, что приводит к более реалистичному и четкому восприятию. Кроме того, внедрение 3D-экранов, в том числе технологий для реализации НТС-терминалов, вывело опыт погружения на новый уровень, поз-

воляя людям испытывать чувство физического присутствия в удаленном месте. Для эффективного телеприсутствия необходим четкий звук с возможностью подавления шума. Достижения в этой области помогли устраниТЬ эхо и окружающий шум, улучшить качество звука и сделать речь более плавной и естественной. Кроме того, для эффективного телеприсутствия крайне важен интуитивно понятный и простой в использовании интерфейс, совершение которого привело к упрощению взаимодействия и управления устройствами телеприсутствия. Пользователи теперь могут управлять функциями с помощью жестов или голосовых команд, используя более удобные устройства. В перспективе доступ к услугам метавселенных будет обеспечен через костюмы телеприсутствия.

История технологии телеприсутствия началась в 1960-х гг., когда простые системы камер и экранов транслировали статические изображения пользователей. В 2020-е гг., с развитием таких передовых технологий, как VR и AR, AI и ML, потенциал телеприсутствия стал еще более очевидным. Эта технология становится все более распространенной и в скором времени станет неотъемлемой частью нашей повседневной жизни. Иллюстрация эволюции систем телеприсутствия представлена на рисунке 7 [29].

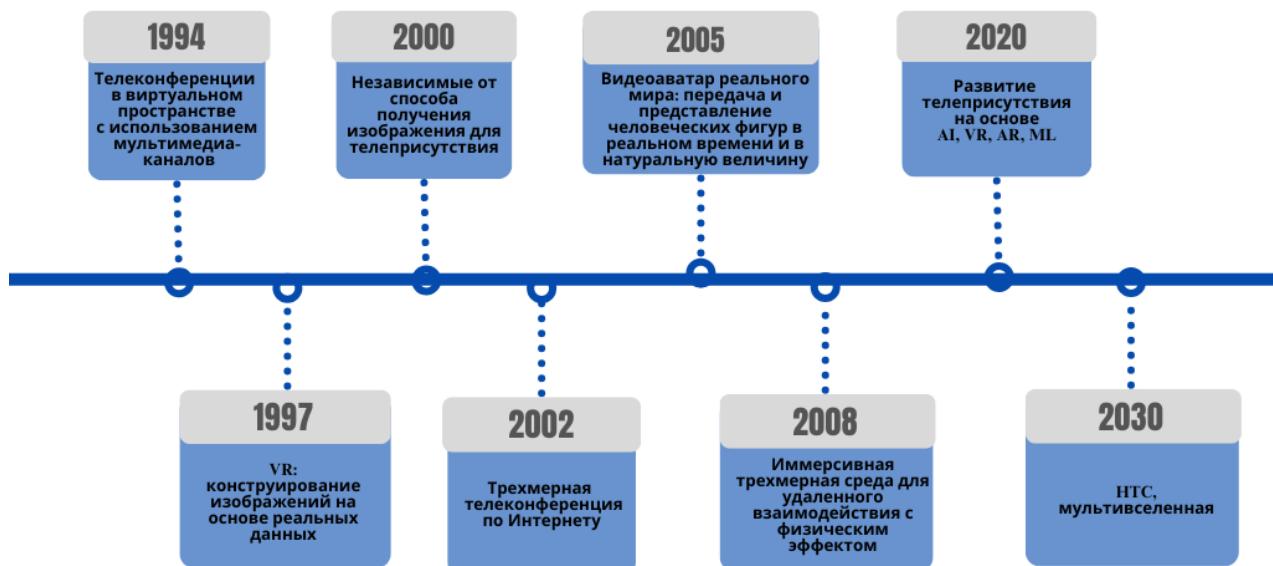


Рис. 7. Эволюция технологий телеприсутствия

Применение туманных вычислений в услугах телеприсутствия

Данное исследование представляет обзор ключевых этапов эволюции технологии телеприсутствия, которое на начальном этапе реализовывалось посредством видеоконференций в виртуальных пространствах с использованием множества камер для сбора количественных данных и информации о глубине [30]. В 1997 г. был разработан виртуальный мир на основе реальных сцен, что позволило наблюдателям воспринимать движение в виртуальной последовательности [31]. Тем не менее движение виртуальных изображений характеризовалось

прерывистостью, что побудило исследователей предложить метод захвата сцены, независимый от угла обзора, для применения в системах телеприсутствия [32].

Далее последовало внедрение технологии 3D-сотрудничества через сеть Интернет-2, что стало возможным благодаря разработке новых подходов к передаче сгенерированных изображений, не зависящих от угла обзора [33]. Однако ограничения аппаратного обеспечения и сложности настройки систем отображения сохранялись. Это привело к созданию системы передачи и воспроизведения изображения человека в натуральную величину в реальном времени, в которой изображение человека захватывалось несколькими камерами, передавалось по сети и проецировалось на врачающуюся плоскую панель [34]. Однако проблемы не были полностью устранены: возникало перекрытие между наблюдателем и системой отображения. Ответом стала разработка иммерсивной 3D-среды для удаленного сотрудничества и обучения физическим действиям, обеспечивающей реконструкцию пользователя в трехмерном формате в реальном времени [35]. Начиная с 2020-х гг., технология телеприсутствия получила широкое распространение в различных областях, в том числе в образовании, здравоохранении и бизнесе.

В настоящее время развитие дистанционных услуг в целом и телеприсутствия в частности сталкивается с рядом угроз и вызовов, включая задержку сети, нестабильность соединения и угрозы безопасности. Типичные способы создания телеприсутствия подразумевают использование камер, отслеживающих движения головы оператора, стереоскопического зрения, звуковой обратной связи, силовой обратной связи и сенсоров прикосновения. Для идеального телеприсутствия необходимо передавать все человеческие ощущения от удаленного объекта к оператору. Для записи физического присутствия требуется трехмерное изображение в сочетании со стереозвуком. Трехмерный голограммический дисплей будет требовать большого объема данных (порядка 4,32 Тбит/с) на чрезвычайно надежной сети передачи данных [36]. Задержка должна быть менее 1 мс, чтобы обеспечить синхронизацию нескольких точек зрения, что очевидно будет ставить серьезные коммуникационные ограничения на используемую сеть.

Применение облачных вычислений для поддержки передачи, хранения и обработки данных уже в некоторой степени решило проблему хранения и вычислений в централизованном центре обработки данных через ядро сети. Однако, согласно исследованиям, вызов, стоящий перед технологией телеприсутствия в последние годы, заключается в быстром росте числа мобильных устройств. По прогнозам исследователей, к 2030 г. глобальный мобильный трафик увеличится в 670 раз по сравнению с 2010 г. в основном из-за развития межмашинного взаимодействия (M2M, *аббр. от англ. Machine-to-Machine Communication*) [37]. И туманные вычисления появились как одно из новых технологических решений вышеупомянутых проблем. Теперь облачные сервисы переносят из ядра в края сети, что значительно снижает задержку, тем самым улучшая производительность приложений телеприсутствия. Это особенно важно для приложений в реальном времени, таких как видеоконференции и онлайн-игры. Более того, туманные вычисления могут легко масштабироваться для удовлетворения растущего спроса на вычислительные ресурсы.

щих потребностей приложений телеприсутствия, поэтому их применение к услугам мобильных сетей 5G и 6G является перспективным направлением развития, которое привлекает внимание исследователей [38].

В ходе исследования был проведен анализ данных поиска на веб-сайте IEEE Xplore (<https://ieeexplore.ieee.org>), посвященном науке и технологиям, с целью объективной оценки исследований, связанных с технологией телеприсутствия. По ключевому слову *telepresence* было найдено более 700 публикаций за короткий период времени (с 2020 по 2023 гг.), в который произошел стремительный рост этой технологии. Среди наиболее распространенных направлений исследований можно назвать: ключевые технологии, приложения, концепции и направления развития, воздействия, требования и вызовы. Количество и структура публикаций IEEE Xplore по темам исследований приведены в таблице 1 и на рисунке 8.

Таблица 1 – Количество публикаций IEEE Xplore по темам исследований

Тема исследования	Количество публикаций
Ключевые технологии	403
Приложения	190
Концепции и направления развития	60
Воздействия	40
Требования	6
Вызовы	7

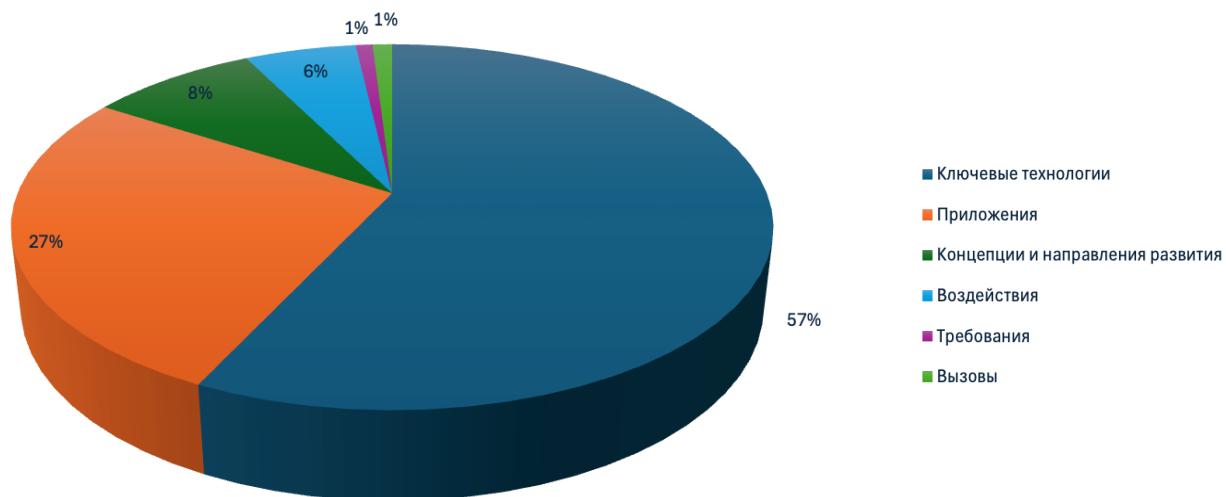


Рис. 8. Тематическая структура публикаций на сайте IEEE Xplore

Анализируя содержание указанных публикаций, можно сделать вывод, что исследования в области телеприсутствия в основном сосредоточены на двух направлениях: приложения телеприсутствия и ключевые технологии. При этом наибольшее внимание уделяется разработке роботов для медицины, обра-

зования и других сфер, где они могут заменить человека. Кроме того, было выявлено, что количество исследований по применению туманных вычислений в телеприсутствии пока очень незначительно, они практически отсутствуют.

В связи с очень быстрым ростом глобального мобильного трафика разработка и внедрение технологии туманных вычислений для решения проблем сети становятся крайне актуальными. Примечательно, что несмотря на большое внимание исследователей к области туманных вычислений, в том числе в IoT и Тактильном интернете, изучение этой технологии применительно к услугам, предоставляемым мобильными сетями 5G и 6G (например, телеприсутствию), очень незначительно. В связи с этим представляется необходимым провести более глубокое исследование применения технологии туманных вычислений для услуг телеприсутствия 5G, 6G и последующих поколений сетей.

Направления дальнейших исследований

Стремительное развитие технологий привело к появлению множества распределенных конечных точек, генерирующих огромные объемы данных, которые требуют тщательной обработки. В этом контексте туманные вычисления выступают в качестве критически важного инструмента для поддержки сложных устройств, приближая вычисления к источнику данных. Чтобы полностью раскрыть потенциал туманных вычислений, необходимо исследовать и изучать их различные аспекты, как говорилось выше. В данной статье описаны несколько направлений исследований, которые привлекают значительный интерес в различных областях туманных вычислений, как показано на рисунке 9 и в таблице 2.



Рис. 9. Направления исследований в области туманных вычислений

Таблица 2 – Направления будущих исследований в области туманных вычислений

Направление исследований	Цель	Потенциальные трудности
Сервисы URLLC	Обеспечение высокой надежности и малой задержки для приложений реального времени в средах туманных вычислений	Масштабируемость, энергопотребление, стабильная производительность на устройствах
Фреймворк	Разработка фреймворков для простого развертывания и управления приложениями туманных вычислений	Совместимость, сложность, обновления в реальном времени
Сеть SDN	Использование SDN для гибкого и эффективного управления и координации устройств туманных вычислений	Сложности интеграции с существующей инфраструктурой, обеспечение безопасности, издержки централизованного управления
Устройства	Создание адаптивных, высокопроизводительных, энергоэффективных устройств туманных вычислений	
Алгоритмы	Оптимизация использования ресурсов, обработки данных и распределения приложений в туманных вычислениях	Балансировка нагрузки, масштабируемость, динамическая адаптация

Целью будущих исследований в области туманных вычислений является создание новых фреймворков, предлагающих интерфейс прикладного программирования API (*аббр. от англ. Application Programming Interface*) и инструменты для простой и эффективной разработки, развертывания и управления приложениями. Эффективность разработанных фреймворков будет оцениваться по таким критериям, как производительность, масштабируемость, безопасность и удобство использования. Основное внимание будет уделено области Fog2Fog-миграции (перемещению вычислительных задач и сервисов между узлами туманных вычислений по принципу федеративной архитектуры), определению туманности (идентификации, классификации и настройке туманных узлов в распределенной сети) и Fog2Fog-сетям (сетям, обеспечивающим взаимодействие и координацию между различными туманными узлами). Данное исследование обещает внести вклад в развитие туманных вычислений, предоставив новые и эффективные структуры, которые позволят легко и эффективно развертывать приложения и управлять ими.

Заключение

В данной статье представлен обзор основных направлений развития сетей 6G. После тщательного анализа более 700 публикаций из базы данных IEEE Xplore и проведения исследования потенциала туманных вычислений для поддержки услуг телеприсутствия в сетях 6G авторы пришли к следующим выводам.

Во-первых, туманные вычисления играют решающую роль в обеспечении высокой производительности и надежности приложений реального времени. Анализ показал, что использование этой технологии позволяет значительно снизить задержки в передаче данных и повысить стабильность сети, что крайне важно для телеприсутствия, где требуется мгновенная обработка больших объемов информации.

Во-вторых, было выявлено, что существующие модели туманных вычислений (например, разработанная компанией Cisco) сталкиваются с определенными трудностями. Среди них – недостаточная точность определения узлов и уязвимости в области безопасности. Эти ограничения указывают на необходимость дальнейших улучшений и доработок. Кроме того, несмотря на прогресс в развитии технологий телеприсутствия, их интеграция с туманными вычислениями остается недостаточно исследованной областью, что подчеркивает перспективность этого направления для будущих научных изысканий.

Наконец, анализ позволил нам сделать вывод, что для успешной реализации потенциала туманных вычислений в сетях 6G требуется разработка новых подходов: создание оптимизированных фреймворков, улучшение алгоритмов и проектирование энергоэффективных устройств. Такие шаги помогут преодолеть существующие ограничения облачных вычислений и заложить фундамент для интеллектуальных систем связи, обеспечивающих качественное удаленное взаимодействие.

Таким образом, данное исследование демонстрирует, что туманные вычисления обладают огромным потенциалом для развития телеприсутствия и сетей 6G. Однако для полной реализации их возможностей необходимо продолжать научные и практические разработки в этой области.

Литература

1. David K., Berndt H. 6G Vision and Requirements: Is there any Need for Beyond 5G? // IEEE Vehicular Technology Magazine. 2018. Vol. 13. Iss. 3. PP. 72–80. DOI: 10.1109/MVT.2018.2848498
2. Nguyen D. C., Ding M., Pathirana P. N., Seneviratne A., Li J. et al. 6G Internet of Things: A Comprehensive Survey // IEEE Internet of Things Journal. 2022. Vol. 9. Iss. 1. PP. 359–383. DOI: 10.1109/JIOT.2021.3103320
3. Series M. IMT Vision–Framework and Overall Objectives of the Future Development of IMT for 2020 and Beyond // Recommendation ITU 2083.0. 2015.
4. Горбачева Л. С., Волков А. Н. Анализ структуры и характеристик межзвёздных // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 1. С. 29–39. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-29-39. EDN: PDZPEP
5. Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 2. С. 32–43. DOI: 10.31854/2307-1303-2020 8-2-32-43
6. Кучерявый А. Е., Маколкина М. А., Киричек Р. В. Тактильный интернет. Сети связи со сверхмалыми задержками // Электросвязь. 2016. № 1. С. 44–46. EDN: VLPHZZ

7. Выборнова А. И., Кучерявыи А. Е. Тактильный интернет: новые возможности и задачи // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТИТ-2016. Первый научный форум «Телекоммуникации: теория и технологии» 3Т-2016: Сборник трудов XIV Международной научно-технической конференции (Самара, 22–24 ноября 2016 г.). Самара: Поволжский гос. ун-т телекоммуникаций и информатики, 2016. С. 133–134. EDN: ZAFYGT

8. Жилищное хозяйство в России. 2016: Статистический сборник. М.: Росстат, 2016. 63 с.

9. Трейвиш А. Россия: население и пространство // Демоскоп Weekly. 2003. № 95–96. URL: https://www.demoscope.ru/weekly/2003/095/s_map.php (дата обращения 11.10.2024)

10. Чистова Н. А., Кучерявыи А. Е. Анализ технико-экономических последствий внедрения сетей связи с ультрамалыми задержками // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 4. С. 53–60. EDN: JJPIPG

11. Бородин А. С. Разработка и исследование методов построения сетей связи пятого поколения: дисс. ... канд. тех. наук. СПб.: СПбГУТ, 2019. EDN: XCWEKB

12. Kalem G., Vayvay O., Sennaroglu B., Tozan H. Technology Forecasting in the Mobile Telecommunication Industry: A Case Study towards the 5G Era // Engineering Management Journal. 2021. Vol. 33. Iss. 1. PP. 15–29. DOI: 10.1080/10429247.2020.1764833

13. Litman T. Autonomous Vehicle Implementation Predictions. Victoria Transport Policy Institute. 2021. URL: <https://www.vtpi.org/avip.pdf> (Accessed 11.10.2024)

14. Kafle V. P., Fukushima Y., Harai H. Internet of things standardization in ITU and Prospective Networking Technologies // IEEE Communications Magazine. Vol. 54. Iss. 9. PP. 43–49. DOI: 10.1109/MCOM.2016.7565271

15. Ash G., Morton A., Dolly M., Tarapore P., Dvorak. Y.1541-QOSM: Model for Networks Using Y.1541 Quality-of-Service Classes. 2010. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5976> (Accessed 13.10.2024)

16. Bennett C. H., Bernstein E., Brassard G., Vazirani U., Strengths and Weaknesses of Quantum Computing // SIAM Journal on Computing. 1997. Vol. 26. Iss. 5. PP. 1510–1523. DOI: 10.1137/S0097539796300933

17. Brassard G., Høyer P., Tapp A. Quantum Cryptanalysis of Hash and Claw-Free Functions // Proceedings of Third Latin American Symposium “LATIN’98: Theoretical Informatics” (April 20–24, 1998, Campinas, Brazil). 1998. PP. 163–169.

18. Diffie W., Hellman M. E. New Directions in Cryptography // Democratizing Cryptography: The Work of Whitfield Diffie and Martin Hellman. 2022. PP. 365–390. DOI: 10.1145/3549993.3550007

19. Fang D., Qian Y., Hu R. Q. Security for 5G Mobile Wireless Networks // IEEE Access. 2017. Vol. 6. PP. 4850–4874. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2779146

20. Grover L. K. A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search // Proceedings of the Twenty-Eighth Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC’96, May 22–24, 1996, Philadelphia, USA). New York, 1996. PP. 212–219. DOI: 10.1145/237814.237866

21. Uwaechia A. N., Mahyuddin N. M. A Comprehensive Survey on Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation Wireless Networks: Feasibility and Challenges // IEEE Access. 2020. Vol. 8. PP. 62367–62414. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984204
22. Hoffstein J., Pipher J., Silverman J. H. NTRU: A Ring-Based Public Key Cryptosystem // Algorithmic Number Theory (ANTS 1998). Lecture Notes in Computer Science. Vol. 1423 / Ed. by J. P. Buhler. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998. PP. 267–288. DOI: 10.1007/BFb0054868
23. Hosoyamada A., Sasaki Y. Finding Hash Collisions with Quantum Computers by Using Differential Trails with Smaller Probability than Birthday Bound // Proceedings of 39th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques “Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2020” (May 10–14, 2020, Zagreb, Croatia). Part II (Lecture Notes in Computer Science. Vol. 12106) / Ed. by A. Canteaut, Y. Ishai. Cham: Springer International Publishing, 2020. PP. 249–279. DOI: 10.1007/978-3-030-45724-2_9
24. Latva-aho M., Leppänen K. Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence. 2019. URL: <http://urn.fi/urn:isbn:9789526223544>
25. McEliece R. J. A Public-Key Cryptosystem Based on Algebraic Coding Theory // The Deep Space Network Progress Report 42–44. 1978. PP. 114–116.
26. Proos J., Zalka C. Shor’s Discrete Logarithm Quantum Algorithm for Elliptic Curves // Quantum Information and Computation. 2003. Vol. 3. Iss. 4. PP. 317–344. DOI: 10.26421/QIC3.4-3
27. Puliafito C., Mingozi E., Longo F., Puliafito A., Rana O. F. Fog Computing for the Internet of Things: A Survey // ACM Transactions on Internet Technology (TOIT). 2019. Vol. 19. Iss. 2. PP. 1–41. DOI: 10.1145/330144
28. Verma M., Bhardwaj N., Yadav A. K. Real time efficient scheduling algorithm for Load Balancing in Fog Computing Environment // International Journal of Information Technology and Computer Science. 2016. Vol. 8. Iss. 4. PP. 1–10. DOI: 10.5815/ijitcs.2016.04.01. EDN: KENONN
29. Fadzli F. E., Ismail A. W., Aladin M. Y. F., Othman N. Z. S. A Review of Mixed Reality Telepresence // Proceedings of 2nd Joint Conference on Green Engineering Technology & Applied Computing 2020 (February 4–5, 2020, Bangkok, Thailand). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 864 (1). P. 012081. DOI: 10.1088/1757-899X/864/1/012081
30. Fuchs H., Bishop G., Arthur K., McMillan L., Bajcsy R. et al. Virtual Space Teleconferencing Using a Sea of Cameras // Proceedings of First International Conference on Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (September 22–24, 1994, Pittsburgh, USA). 1994. 161–167.
31. Kanade T., Rander P., Narayanan P. J. Virtualized Reality: Constructing Virtual Worlds from Real Scenes // IEEE Multimedia. 1997. Vol. 4. Iss. 1. PP. 34–47. DOI: 10.1109/93.580394
32. Mulligan J., Daniilidis K. View-Independent Scene Acquisition for Tele-Presence // Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR 2000, 05–06 October 2000, Munich, Germany). 2000. PP. 105–108. DOI: 10.1109/ISAR.2000.880933

33. Towles H., Chen W.-C., Yang R., Kum S.-U., Kelshikar H. F. N., et al. 3D Tele-Collaboration over Internet2 // International Workshop on Immersive Telepresence (December 6, 2002, Juan Les Pins, Citeseer, France). 2002. PP. 41–47.

34. Tanikaw T., Suzuki Y., Hirota K., Hirose M. Real World Video Avatar: Real-Time and Real-Size Transmission and Presentation of Human Figure // Proceedings of the International Conference on Augmented Tele-Existence (ICAT'2005, December 5–8, 2005, Christchurch, New Zealand). 2005. PP. 112–118. DOI: 10.1145/1152399.1152421

35. Kurillo G., Bajcsy R., Nahrsted K., Kreylos O. Immersive 3D Environment for Remote Collaboration and Training of Physical Activities // Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (08–12 March 2008, Reno, USA). PP. 269–270. DOI: 10.1109/VR.2008.4480795

36. Ali A., Hussain S. M., Begh G. R. 6G and IoT Use Cases // 6G Wireless / Ed. by F. Tariq, M. Khandaker, I. Sh. Ansari. CRC Press, 2023. PP. 315–340.

37. Fettweis G., Alamouti S. 5G: Personal Mobile Internet Beyond what Cellular Did to Telephony // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 2. PP. 140–145. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6736754

38. Dang S., Amin O., Shihada B., Alouini M. S. What Should 6G Be? // Nature Electronics. 2020. Vol. 3. PP. 20–29. DOI: 10.1038/s41928-019-0355-6

**Статья поступила 18 октября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 29 ноября 2024 г.
Принята к публикации 23 декабря 2024 г.**

Информация об авторах

Данг Ван Тханг – аспирант кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: dang.vt@sut.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

<https://doi.org/10.31854/2307-1303-2024-12-3-29-51>
EDN: RDQBHH

Telepresence Services and Their Future in the Evolving Fog Computing Environment: A Review of Research and Use Cases

Dang V. Th.✉, A. Volkov

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

Objective. The research aims to analyze fog computing technologies and their integration into future 6G networks to support telepresence services. The main task is to identify the key trends and development directions of telepresence technologies, network instability, and data security. The objective of the work is to conduct a review of telepresence research and explore the application of fog computing to support it in 5G and 6G networks. **The goal** is to review research on telepresence and explore the application of fog computing to support these services in 5G and 6G networks. The study proposes enhancing network resilience by applying resource-intensive methods only in routing zones affected by destabilizing factors, thereby minimizing computational costs. The research highlights the necessity for further developments and investments in integrating these technologies. **Methods Used.** The study involves analyzing over 700 publications from the IEEE Xplore database on research topics related to telepresence and fog computing; reviewing modern technologies and approaches in the field of fog computing; critically analyzing existing fog computing models, including hierarchical and multi-level architectures; and performing statistical analysis to identify the primary trends and research directions. **Novelty.** The novelty of the work lies in conducting a statistical analysis of current telepresence research on an unprecedented scale. The limitations of existing fog computing models have been examined, and solutions to overcome them for effective application in 6G networks have been proposed. Special emphasis is placed on the importance of integrating fog computing to address latency and network instability issues in telepresence services. **Results.** The work identifies key research directions in telepresence, such as the development of robots for medicine, education, and other fields where they can replace humans, thereby enhancing service efficiency and accessibility. The potential of fog computing to support real-time telepresence applications has been substantiated, significantly reducing latency and improving network stability. The necessity of refining fog computing architectures to ensure high reliability, scalability, and minimal latency in future networks like 5G and 6G has been underscored. **Theoretical / Practical Significance.** The work has theoretical significance by providing a foundation for further research in telepresence and fog computing, while also broadening the understanding of their application for addressing latency and network stability issues. The practical significance lies in the potential use of the results for developing more efficient 6G network architectures and introducing innovative solutions in telepresence, improving communication quality, reducing latency, and enhancing interaction in remote environments.

Key words: 6G, fog computing, cloud computing, telepresence, mobile communication, next-generation networks

Information about Author

Dang Van Thang – Postgraduate Student at the Department of Communication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: dang.vt@sut.ru

Volkov Artem – Candidate of Technical 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