

Конвергенция сетей 6G и Метавселенной: архитектурные подходы и сетевые требования для экосистемы CityVerse

М. А. Белов, Ахмед Аль-Анси, Аммар Мутханна

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

belov.maksim.alekseevich@gmail.com, ahmedalansi16@gmail.com, ammarexpress@gmail.com

Аннотация. Ожидаемый к 2030 году коммерческий запуск сетей мобильной связи шестого поколения (6G) в рамках концепции ИМТ-2030 открывает технологические возможности для полномасштабной реализации метавселенной для городов, классифицируемой как CityVerse. Согласно техническим отчетам Фокус-группы МСЭ, концепция CityVerse строго ставит в приоритет человекоцентричный подход и способствует устойчивому развитию. Функционирование данной экосистемы базируется на интеграции динамических цифровых двойников, массовом межмашинном взаимодействии с плотностью до 10^8 устройств на квадратный километр и сервисах голографического телеприсутствия. Указанные сценарии требуют обеспечения задержек в пользовательской плоскости на уровне ≤ 1 мс и пиковых скоростей передачи данных до 1 Тбит/с. Ввиду неспособности традиционных облачных архитектур гарантировать выполнение заданных требований, в исследовании обоснована необходимость перехода к модели иерархической многоуровневой выгрузки вычислений на базе парадигмы Fog/MEC (туманные и периферийные вычисления). Работа содержит критический анализ технологических барьеров и пробелов в стандартизации, в частности, физических ограничений распространения сигналов в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот и отсутствия унифицированных протоколов функциональной совместимости цифровых аватаров между независимыми платформами метавселенной.

Ключевые слова: 6G, Метавселенная, CityVerse, цифровые двойники, периферийные вычисления, Fog/MEC

I. ВВЕДЕНИЕ

Эволюция инфокоммуникационных технологий обуславливает переход от концепции традиционных «умных городов» (smart cities) к формированию интегрированной киберфизической среды. Коммерческое развертывание сетей мобильной связи шестого поколения (6G), запланированное к 2030 году в рамках концепции ИМТ-2030, является технологическим базисом для полномасштабной реализации экосистемы метавселенной. В данном контексте в техническом отчете Фокус-группы Международного союза электросвязи по метавселенной (ITU FG-MV) регламентировано понятие CityVerse:

“CitiVerse (option one): metaverse for cities. NOTE: CitiVerse seeks to prioritize a human-centred approach and promote sustainable development. CitiVerse (option two): metaverse for cities prioritizing a

human-centred approach and promoting sustainable development.” (с англ.:

CitiVerse (вариант 1): метавселенная для городов. ПРИМЕЧАНИЕ: CitiVerse стремится уделять приоритетное внимание ориентированному на человека подходу и содействовать устойчивому развитию. CitiVerse (вариант 2): метавселенная для городов, уделяющая приоритетное внимание ориентированному на человека подходу и содействующая устойчивому развитию).

Концепция CityVerse ориентирована на решение задач урбанизации, повышение качества жизни населения, обеспечение инклюзивности и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду в соответствии с целями устойчивого развития. Функционирование данной экосистемы базируется на интеграции комплекса технологий, включая искусственный интеллект (ИИ), системы распределенных реестров (блокчейн), расширенную реальность (XR) и Интернет вещей (IoT).

Поддержка иммерсивных сервисов, синхронизация цифровых двойников в реальном времени и обеспечение массивного межмашинного взаимодействия с плотностью до 10^8 устройств на квадратный километр формируют жесткие требования к пропускной способности и задержкам. Данные требования формализованы в рамках спецификаций МСЭ ИМТ-2030, описывающих целевые ключевые показатели эффективности (KPI) для сетей 6G [1]. Достижение пиковой скорости передачи данных до 1 Тбит/с в нисходящем канале и задержки в пользовательской плоскости на уровне ≤ 1 мс критически важно для функционирования сервисов голографического телеприсутствия и тактильного интернета. В указанных сценариях рассинхронизация сенсорных, аудиальных и визуальных потоков данных приводит к возникновению киберболезни (motion sickness) и существенному снижению качества восприятия (QoE).

Несмотря на заявленные характеристики радиointерфейса сетей 6G, архитектура традиционных облачных вычислений обладает существенными ограничениями при обслуживании чувствительных к задержкам сервисов CityVerse. Проблема заключается в географической удаленности облачных центров обработки данных (ЦОД) от конечных пользователей, что приводит к увеличению сквозной задержки (end-to-end latency). Кроме того, целевая плотность устройств Интернета вещей, достигающая 10^8 активных

соединений на квадратный километр, инициирует генерацию значительного объема трафика. Передача необработанных данных от конечных узлов в центральное облако для последующей аналитики и рендеринга вызывает перегрузку магистральных каналов связи (backbone congestion), увеличение джиттера и потери пакетов.

Следовательно, традиционная централизованная парадигма облачных вычислений препятствует обеспечению заданного качества обслуживания (QoS) и качества восприятия (QoE) для сервисов метавселенной. Устранение данных архитектурных ограничений требует перехода к децентрализованной иерархической модели выгрузки вычислений (computation offloading) на базе парадигмы туманных и граничных вычислений (Fog/MEC). Данное архитектурное решение позволяет перенести вычислительные мощности, ресурсы хранения и алгоритмы искусственного интеллекта на периферию сети, тем самым минимизируя круговую задержку и снижая нагрузку на магистральные каналы связи.

II. СЦЕНАРИИ РЕАЛИЗАЦИИ CITYVERSE И АРХИТЕКТУРА ИЕРАРХИЧЕСКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Устранение архитектурных противоречий между жесткими сетевыми требованиями CityVerse и физическими ограничениями существующих топологий связи требует системного инженерного анализа процессов распределения вычислительных мощностей. В рамках данного раздела осуществляется декомпозиция сервисной структуры метавселенной для городов и обосновывается переход к иерархической вычислительной парадигме.

Сервисная модель CityVerse базируется на интеграции физических и виртуальных процессов, которые классифицируются по трем ключевым векторам услуг. Первым вектором выступают иммерсивные коммуникации и сервисы голографического телеприсутствия (Holographic-Type Communication, HTC). Данная технология обеспечивает передачу объемных трехмерных изображений пользователей и объектов в реальном времени с целью создания эффекта физического присутствия в удаленной локации. Рендеринг динамических облаков точек и синхронизация мультимодальных потоков данных требуют обеспечения сверхвысокой пропускной способности до 1 Тбит/с в нисходящем канале при строгом удержании задержки в пользовательской плоскости на уровне 1 мс.

Вторым вектором являются динамические цифровые двойники (Digital Twins). В парадигме CityVerse они представляют собой не статические 3D-модели, а динамические, двунаправленные киберфизические системы. Данные системы интегрируют потоки данных с устройств Интернета вещей (IoT) с плотностью до 10^8 устройств на квадратный километр для отражения физических параметров в реальном времени и выполнения предиктивной аналитики.

Третий вектор включает взаимодействие на базе искусственного интеллекта (ИИ) и роботизированное телеприсутствие. В данном сценарии оператор осуществляет дистанционное управление физическим роботом (в частности, при проведении медицинских операций или обслуживании инфраструктуры) через интерфейсы метавселенной с использованием цифровых

аватаров. Этот сценарий диктует жесткие требования к надежности соединения на уровне 99,999% (вероятность успешной доставки пакетов) и задержке передачи управляющих тактильных сигналов на уровне 1 мс.

Реализация данной экосистемы на макроуровне требует перехода от традиционной модели государственно-частного партнерства (Public-Private Partnership, PPP) к концепции партнерства PPPPP (Public-Private-People-Planet Partnerships) [2]. Согласно техническому отчету МСЭ FGMV-35, данная модель определяет государство, бизнес, общество и планету как интегрированных участников проектирования CityVerse. Участие общества обеспечивает социальное благополучие и инклюзивность, в то время как интеграция интересов «планеты» требует системного учета экологического следа и приоритета защиты окружающей среды на этапе первоначального проектирования.

С технической точки зрения реализация концепции цифровых двойников в рамках модели PPPPP организована в виде масштабируемой восьмиуровневой структуры, охватывающей сущности среды от планетарного масштаба до биомолекулярного уровня.

1. Planet Twin (Планетарный двойник): Использование технологий метавселенной для визуализации и мониторинга данных планетарного масштаба, включая прогнозирование изменения климата, предотвращение стихийных бедствий, управление ресурсами и сохранение биоразнообразия.
2. Region Twin (Региональный двойник): Обеспечение межрегионального взаимодействия макрорегионов (например, Африки, Европы, Латинской Америки) для совместного использования инфраструктурных ресурсов и данных.
3. Country Twin (Национальный двойник): Синхронизация всех экосистем CityVerse в масштабах государства для оптимизации функционирования национальной инфраструктуры и форсирования цифровой трансформации.
4. City Twin (Городской двойник): Полномасштабная интеграция данных и алгоритмов искусственного интеллекта для иммерсивного, синхронизированного управления мегаполисом и реализации цифровой трансформации городов.
5. Component Twin (Компонентный двойник): Цифровое представление базовых подсистем городской среды, включая сети связи, системы энерго- и водоснабжения, инфраструктуру управления чрезвычайными ситуациями и сельское хозяйство.
6. Building Twin (Двойник здания): Цифровая реплика физического сооружения, предназначенная для управления техническим обслуживанием и эксплуатацией здания, оптимизации использования пространства и контроля качества воздуха.
7. Citizen Twin (Двойник гражданина): Цифровой двойник субъекта (также классифицируемый как

human twin), применяемый для предиктивной медицинской аналитики, персонализированной медицины, мониторинга перемещений и повышения индивидуальной производительности без полной репликации личности.

8. Biomolecule Twin (Биомолекулярный двойник): Вычислительная модель с высокой степенью точности, воспроизводящая структуру и динамику взаимодействия специфических биомолекул. Применяется для проектирования белков, разработки биоматериалов и открытия лекарственных препаратов.

Для обеспечения функционирования восьмьюровневой структуры CityVerse и выполнения требований иммерсивных сервисов к качеству обслуживания (QoS) обоснован переход к четырехуровневой вычислительной модели выгрузки задач (computation offloading) на базе парадигмы Fog/MEC.

Нижний уровень формируют пользовательские устройства (End Devices), включая датчики Интернета вещей (IoT), гарнитуры расширенной реальности (XR), смартфоны и автономные транспортные средства. Указанные устройства осуществляют первичный сбор данных и локальную обработку, однако их функционирование лимитировано емкостью батареи и доступной вычислительной мощностью. Второй уровень представлен туманными узлами (Fog Nodes), размещаемыми на уровне локальных сетей или IoT-шлюзов. Данные узлы обеспечивают агрегацию и предварительную обработку данных вблизи источников их генерации с минимальной задержкой. Третий уровень составляют серверы граничных вычислений (MEC — Multi-access Edge Computing), интегрированные непосредственно в базовые станции сетей связи. На MEC-узлы динамически выгружаются ресурсоемкие микросервисы, требующие сверхнизких задержек, включая пространственный трекинг и рендеринг голографических потоков [6]. Четвертый уровень формируют облачные центры обработки данных (Cloud Core), предназначенные для выполнения задач, не критичных к времени отклика: обучение глобальных моделей искусственного интеллекта (ИИ), хранение массивов исторических данных и оркестрация планетарных цифровых двойников (Planet Twin).

Фундаментом данной архитектуры является распределенный алгоритм выноса вычислений и приоритетного управления микросервисами. Алгоритм в реальном времени анализирует метрики состояния сети, доступность граничных ресурсов и профиль требований услуги. Критические задачи, в частности тактильная обратная связь для систем роботизированного телеприсутствия, получают наивысший приоритет и обрабатываются на уровне Fog или MEC, обеспечивая задержку на уровне 1 миллисекунды и менее. Фоновые и некритичные к задержке вычисления перенаправляются в центральное облако. Рассмотренный архитектурный подход позволяет минимизировать круговую задержку и джиттер, а также снизить энергопотребление пользовательских устройств посредством переноса вычислительной нагрузки на периферийные серверы.

III. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И МЕЖДУНАРОДНАЯ СТАНДАРТИЗАЦИЯ

Масштабирование экосистемы метавселенной для городов (CityVerse) и ее трансформация из разрозненных пилотных проектов в глобальную инфраструктурную сеть технологически невозможны без создания универсальных механизмов бесшовного взаимодействия. Текущая фрагментация платформ, при которой технологические корпорации разрабатывают изолированные и закрытые метавселенные, требует выработки комплексной нормативно-технической базы на международном уровне.

Ключевым вектором масштабирования является обеспечение межплатформенной функциональной совместимости. В рамках технической спецификации МСЭ FGMV-43 детально определена высокоуровневая архитектура функциональной совместимости для кроссплатформенного взаимодействия метавселенных (High-level interoperability architecture for cross-platform metaverse), призванная устранить барьеры между независимыми виртуальными пространствами [3]. Концептуально архитектура опирается на модель, при которой независимые платформы взаимодействуют либо напрямую посредством стандартизированных протокольных интерфейсов, либо через специализированные шлюзы — мосты метавселенных (Metaverse Bridges). Разработанная архитектура включает функциональные компоненты взаимодействия, в частности, компонент совместимости контента (Content Interoperability Functional Component, COIFC) и компонент совместимости активов (Asset Interoperability Functional Component, ASIFC). Внедрение данных компонентов обязывает платформы поддерживать сквозной перенос цифровой собственности: 3D-моделей, токенизированных активов (включая невзаимозаменяемые токены — NFT), цифровых валют и виртуальной недвижимости. Согласование протоколов межплатформенного обмена, стандартизация форматов объемной графики (например, применение унифицированного формата glTF 2.0) и унификация политик управления цифровыми правами (DRM) выступают критическими задачами для обеспечения портативности и совместимости.

Критически важной задачей совместимости является миграция сущностей, в первую очередь — цифрового представления пользователя (аватара). Для решения данной проблемы в рамках МСЭ регламентирована концепция «странствующих аватаров» (roaming avatars). Нормативные документы строго разделяют понятия «домашнего аватара» (home avatar), представляющего собой исходную версию цифрового представления субъекта, закрепленную за конкретной платформой-источником, и странствующего аватара, который осуществляет переход между независимыми платформами метавселенной с сохранением идентичности пользователя и потенциальной адаптацией к характеристикам целевой среды.

Для технического обеспечения данного процесса внедряется компонент функциональной совместимости аватаров (Avatar Interoperability Functional Component, AVIFC), декомпозиция которого строго регламентирует этапы миграции.

- Avatar Transfer Functions (AVTF): управляет передачей данных аватара между исходной и целевой платформами, включая перенос данных о состоянии, профиля, аксессуаров, элементов управления, а также параметров скелетной осанки (rig) и скелета (skeleton). Гарантирует экспорт и импорт цифровой сущности пользователя с сохранением исходных характеристик.
- Avatar Convert Functions (AVCF): осуществляет преобразование данных странствующего аватара (включая внешний вид, аксессуары и данные о состоянии) в случае их несоответствия системным ограничениям и политикам целевой платформы. Обеспечивает адаптацию модели для корректного рендеринга в гетерогенных графических средах.
- Avatar Synchronize Functions (AVSF): выполняет синхронизацию атрибутов и записей об активности аватара между домашней и гостевой платформами. Обеспечивает согласованность цифрового представления пользователя при его перемещении в мультивселенной, исключая фрагментацию цифрового профиля.

Такой стандартизированный подход обеспечивает переносимость цифровой идентичности пользователя при переходе между независимыми виртуальными мирами, исключая необходимость создания нового аватара для каждой платформы.

Параллельно с миграцией аватаров экосистема CityVerse требует масштабируемых механизмов взаимодействия, что диктует необходимость пересмотра принципов идентификации объектов. Концепция управления идентификаторами устройств Интернета вещей (Identity of Things, IDoT) в децентрализованной среде регламентируется техническим отчетом МСЭ FGMV-42, базирующимся на рекомендации ИТУ-T Y.4811 (структура конвергентной службы идентификации и аутентификации IoT-устройств в децентрализованной среде — CSIADe), а также проектом рекомендации ИТУ-T Y.4812. В гибридном пространстве CityVerse IoT-устройства непрерывно передают данные и формируют собственные цифровые сущности. При миграции цифровой сущности IoT-устройства между независимыми метавселенными возникает потребность в универсальной идентификации без обращения к централизованному регистрирующему органу.

В качестве архитектурного решения применяется компонент функциональной совместимости идентичности (Identity Interoperability Functional Component, IDIFC). В данной модели используются распределенные доверенные хранилища на базе технологий распределенного реестра (DLT), с которыми взаимодействуют платформы метавселенной. Каждому устройству присваивается глобальный децентрализованный идентификатор (DID). При миграции функции верификации идентичности (Identity Verify Functions, IDVF) позволяют целевой платформе подтвердить аутентичность переданной идентичности с использованием криптографических подписей и доказательств с нулевым разглашением (zero-knowledge proofs). Это предотвращает несанкционированный

доступ, подмену данных (спуфинг) и гарантирует надежную аутентификацию информационных потоков в распределенных системах CityVerse.

IV. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И СИСТЕМНЫЕ БАРЬЕРЫ

Невзирая на наличие глубоко проработанных теоретических архитектур Fog/MEC и формирование стратегий международной стандартизации, практическое коммерческое внедрение CityVerse сопряжено с серьезными технологическими и системными барьерами. В данном разделе проводится критический анализ (gap analysis) фундаментальных ограничений, препятствующих развертыванию рассмотренных экосистем.

Ключевым технологическим барьером выступают физические ограничения радиоинтерфейса сетей шестого поколения в терагерцовом (ТГц) диапазоне частот. Для достижения заявленных в ИТ-2030 пиковых скоростей передачи данных до 1 Тбит/с сети 6G неизбежно должны задействовать субтерагерцовый и терагерцовый спектр, лежащий в пределах от 100 ГГц до 3 ТГц [4,5]. Однако распространение электромагнитных волн на столь высоких частотах сталкивается с фундаментальными физическими ограничениями. Терагерцовые сигналы подвержены высокому затуханию в свободном пространстве, которое квадратично возрастает с увеличением частоты (Free Space Path Loss, FSPL), и чрезвычайно сильному атмосферному поглощению. В частности, молекулы водяного пара и кислорода выступают мощными абсорбентами радиоволн, создавая ярко выраженные резонансные пики поглощения, преобразуя электромагнитную энергию в кинетическую и вызывая экспоненциальное падение мощности сигнала на дистанции.

Кроме того, малая длина волны ТГц-сигнала обуславливает низкую дифракцию и делает его крайне уязвимым к физическим препятствиям: архитектурные элементы (например, шероховатости бетонных поверхностей), листва деревьев и человеческое тело способны вызвать сильное ослабление или полное блокирование линии прямой видимости (blockage effect), внося дополнительные потери от 20 до 40 дБ. Атмосферные осадки, в частности дождь, вносят дополнительное затухание порядка 10 дБ/км, в то время как влияние тумана на малых дистанциях остается незначительным. В результате этих физических ограничений эффективный радиус покрытия при использовании ТГц-доступа лимитируется дистанциями порядка десятков метров. Компенсация потерь распространения требует обязательного применения узконаправленных фазированных антенных решеток с большим числом элементов и алгоритмов точного отслеживания луча (beam tracking). С архитектурной точки зрения это диктует необходимость сверхплотного развертывания (ultra-dense deployment) малых сот 6G, что многократно усложняет формирование сплошной зоны радиопокрытия для мобильных пользователей CityVerse.

Второй класс барьеров связан с низкой энергоэффективностью и экологическим следом. Внедрение CityVerse рассматривается как фактор устойчивого развития за счет сокращения физической мобильности и оптимизации городских систем через цифровые двойники. Однако данный эффект

нивелируется феноменом «эффекта отскока» (rebound effect), риски которого зафиксированы в технических отчетах МСЭ FGMV-08 и FGMV-49.

Инфраструктура CityVerse характеризуется высокой энергоемкостью. Рендеринг 3D-сред, обучение моделей искусственного интеллекта, обработка транзакций в блокчейн-сетях и функционирование распределенных МЕС-серверов требуют значительных объемов электроэнергии. Это ведет к пропорциональному росту косвенных выбросов парниковых газов (GHG) при использовании невозобновляемых источников энергии.

Дополнительной проблемой является рост объемов электронных отходов (e-waste). Высокие аппаратные требования сокращают жизненный цикл пользовательских XR-гарнитур, IoT-сенсоров и серверного оборудования, что ускоряет их физический и моральный износ. Минимизация указанных рисков требует системного внедрения энергосберегающих алгоритмов и стандартов циркулярной экономики в производстве ИКТ-оборудования.

Третья категория барьеров носит социально-экономический характер. Интеграция технологий метавселенной сопряжена с риском усугубления цифрового неравенства (digital divide). Полноценное участие в экосистеме CityVerse зависит от наличия абонентского оборудования высокой стоимости, включая XR-гарнитур и костюмы телеприсутствия (haptic suits), а также от доступа к высокоскоростным каналам связи. В регионах со слаборазвитой телекоммуникационной инфраструктурой и низким уровнем доходов сверхплотное развертывание сетей 6G затруднено, что ограничивает доступ населения к платформе. Поскольку CityVerse предполагает интеграцию сервисов образования, телемедицины, городского управления и коммерции, отсутствие доступа к инфраструктуре способно привести к глубокой социальной и экономической сегрегации. Нивелирование данного риска требует реализации государственной политики по универсализации связи, разработке механизмов субсидирования и внедрению инклюзивных стандартов взаимодействия

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование подтверждает, что реализация CityVerse технически невозможна без синергии 6G, ИИ-оркестрации и децентрализованной архитектуры Fog/МЕС. Традиционные облачные модели не обеспечивают задержки и пропускную способность, необходимые для голографического телеприсутствия и синхронизации многоуровневых цифровых двойников. Иерархическая выгрузка вычислений на периферию сети – оптимальное архитектурное решение, гарантирующее выполнение показателей ИМТ-2030 по задержкам в пользовательской плоскости на уровне 0,1–1 мс.

Полномасштабному внедрению препятствуют физические ограничения ТГц-диапазона, рост углеродного следа инфраструктуры и риск усиления цифрового неравенства из-за стоимости оборудования. Критическим фактором остается международная стандартизация протоколов совместимости, миграции аватаров и идентификации IoT-устройств. Для запуска CityVerse к 2030 году требуется системная координация усилий МСЭ-Т и 3GPP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Recommendation ITU-R M.2160-0 "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond". ITU-R, Geneva. 2023.
- [2] ITU Technical Report FGMV-35 "Building a people-centred CitiVerse". ITU FG-MV, Geneva. June 2024.
- [3] ITU Technical Specification FGMV-43 "High-level interoperability architecture for cross-platform metaverse". ITU FG-MV, Geneva. June 2024.
- [4] Сети связи шестого поколения: фрактальные архитектуры, голографические взаимодействия, телеприсутствие, сетевые роботы: учебник / А.Е. Кучерявый, А.А. Давуд, А.Н. Волков [и др.]. Санкт-Петербург [и др.] : Питер, 2024. 318, [1] с.
- [5] Ateya A.A., El-Latif A.A.A., Muthanna A., Volkov A., Koucheryavy A. Enabling Metaverse and Telepresence Services in 6G Networks. NY: River Publishers, 2025. 254 p. doi: 10.1201/9788770046749
- [6] Al-Ansi, A., Al-Ansi, A.M., Muthanna, A., Elgendy, I.A., & Koucheryavy, A. (2021). Survey on intelligence edge computing in 6G: Characteristics, challenges, potential use cases, and market drivers. *Future Internet*, 13(5), 118.